



GECAM定位方法及模拟分析

廖进元^{1*}, 罗琦^{1,2*}, 朱玥¹, 宋欣颖¹, 彭文溪¹, 肖硕^{1,2}, 李刚¹, 熊少林¹

1. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心, 北京 100049

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, 廖进元, E-mail: liaojinyuan@ihep.ac.cn; 罗琦, E-mail: luoqi@ihep.ac.cn

收稿日期: 2020-01-21; 接受日期: 2020-04-23; 网络出版日期: 2020-11-11

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052700)和中国科学院前沿科学重点研究计划项目(编号: QYZDB-SSW-SLH012)资助

摘要 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)卫星计划于2020年底发射, 将实现对引力波高能电磁对应体等高能暴发现象的全天监测. GECAM对伽马射线暴的定位是其最重要的科学需求之一. 我们建立了同时拟合伽马射线暴的能谱和定位的GECAM地面定位方法, 并结合GECAM当前质量模型的仪器响应和本底模拟, 对此定位方法的GECAM定位能力进行了考察, 得到了不同亮度、不同能谱硬度、不同暴发持续时间等参数的伽马射线暴的定位精度. 对于典型亮度(10–1000 keV能段下, 通量为 10^{-6} erg s⁻¹ cm⁻², 持续10 s)的中等硬度谱的定位精度在0.6° (1- σ 统计误差)左右. 我们还考察了两个特殊暴发事件: (1) 对于快速射电暴FRB 131104的疑似高能辐射对应体, GECAM定位误差为5°左右; (2) 对于引力波事件GW170817的电磁对应体(GRB 170817A), GECAM定位误差为10°左右.

关键词 GECAM, 定位算法, 模拟

PACS: 95.75.Pq, 98.70.Rz, 95.55.Ka, 95.85.Pw

1 引言

自1973年发现伽马暴以来, 对于伽马暴的研究已历经40多年, 伽马暴的研究对于极端物理、致密天体、宇宙学参数测量等众多领域的理解与认知有着重要的意义^[1]. 2017年首次观测到伽马暴(GRB 170817A)与引力波(GW170817)成协事件, 宣告了多信使引力波天文学时代的到来^[2-4]. 2020年即将发射的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)卫星是以探测引力波伽马暴为主要科学目标的空间天文卫星, 将会实现对引力波高能电磁对应体等高能暴发现象的全天监测.

GECAM将准实时发布暴发事件的暴发时间和定位等信息, 证认和研究暴发源的性质. 其中, 对暴发事件的定位是GECAM最重要的科学需求之一. GECAM除了在轨对伽马暴进行实时触发和定位,

引用格式: 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

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. doi: 10.1360/SSPMA-2020-0018

还将利用短报文数据和数传数据在地面进行更为精细的定位计算. 由于星上计算资源非常有限, 星上定位虽然时间延迟小, 但精度相对地面而言难以达到最优. 地面定位需要等待短报文数据和数传数据, 时间延迟较大, 但会有更高的定位精度. GECAM对伽马暴的精确定位是证认伽马暴与引力波事件成协、生成仪器响应以进行能谱分析、引导其他天文仪器进行多波段后随观测等科学目标的关键.

GECAM不具备直接成像能力, 需要通过伽马射线暴在各探测器的计数分布进行分析, 以获取伽马暴天区位置. GECAM可以采用两种分析方式进行地面定位: 1) 对各探测器的能谱进行拟合, 同时得到伽马暴的能谱以及位置(后称计数分布定位); 2) 基于GECAM双星的设计(也可结合其他在轨卫星的观测), 利用伽马暴在卫星之间的时间延迟进行定位. 本文介绍了GECAM的计数分布定位算法, 并在此定位算法下, 以Geant4模拟的本底和仪器响应对不同参数的伽马射线暴进行了模拟定位, 特别是模拟了特殊伽马暴发事件(快速射电暴FRB 131104疑似伽马射线对应体和引力波GW170817电磁对应体)的定位精度.

2 GECAM简介

GECAM包含两颗卫星, 运行在相同轨道(轨道倾角约为 29° , 轨道高度为600 km)并保持相位相反. 每颗GECAM卫星配备25个伽马射线探测器(Gamma-Ray Detector, GRD)和8个荷电粒子探测器(Charged Particle Detector, CPD). GRD由溴化镧(LaBr₃)晶体和硅光电倍增器(SiPM)组成, 具有探测硬X射线、伽马射线的的能力, 可以对伽马暴进行时变、能谱以及天区位置的测量和研究^[5]. CPD由塑料闪烁体和硅光电倍增器组成, 主要探测电子、质子等荷电粒子, 其主要功能在于识别GRD所探测的暴发现象是否来自粒子事件, 区分伽马暴与粒子事件.

每个GRD均能探测从前部入射的伽马光子, 并且也可以探测从背部入射的能量高(>100 keV)的伽马光子. 25个GRD分别指向不同的方向, 在立体角上近似均匀分布(除了面向地球的方向). 这样的分

布使得每颗星能够宽波段监测地球遮挡外的所有天区($\sim 70\%$ 全天), 并且各入射方向的接收面积基本相当. 因此, GECAM两颗卫星联合可以实现对完整天区灵敏度较为均匀的监测.

在对伽马射线暴定位时, 将在GECAM载荷坐标系下进行分析, 并通过卫星轨道姿态的数据换算到J2000坐标系下, 得到伽马射线暴的赤经和赤纬. GECAM载荷以及载荷坐标系的详细介绍参见本专辑GECAM载荷介绍文章^[6]. 除特别声明外, 以下内容所采用的坐标系均为GECAM载荷坐标系.

3 GECAM计数分布定位算法

对于非成像的伽马暴监测仪器而言, 根据各探测器单体所接收到的光子计数分布进行定位^[7]是国际上最常用的定位方法之一. 对伽马暴进行定位分析这一任务, 在实际进行中需要解决能谱和定位的同时性分析问题^[8]: 能谱分析时用到的仪器响应是高度依赖伽马暴方向的, 伽马暴方向的拟合又离不开伽马暴能谱的确定, 根据各探测器单体所接收的光子数分析必须同时重建伽马暴的方位和能谱. 总体上, 以获取伽马暴位置为主要目的的计数分布分析可以采用两种方案.

(1) 假定暴的能谱为确定的, 通过各探测器光子计数拟合暴的位置. 国际上的伽马暴监测器(如CGRO/BATSE, Fermi/GBM)地面定位程序曾采用了基于该方案所建立的定位算法(BATSE的LOCBURST算法^[9]; Fermi/GBM的DoL算法^[10]). 该方案具备所需计算资源小、计算速度快的特点, 在计算资源紧张的星上定位程序中是首选的方案.

(2) 同时对暴的能谱和位置一起拟合. 方案(1)中, 如果暴的能谱与假定的能谱模板存在差异, 可能会对定位带来无法排除的影响. 例如, 2015年, Connaughton等人^[10]指出Fermi/GBM基于方案(1)所建立的DoL算法在伽马暴定位中存在 8° – 13° 的偏离. 2016年, Burgess等人^[11]提出基于方案(2)的贝叶斯伽马暴位置重建方法(BAYesian Location Reconstructon of GRBs, BALROG), 并且指出该方法能够相对DoL算法有效地消除系统性问题, 以及在能够给出伽马暴良好定位和无法良好限制暴位置的情形

下均给出可靠的定位误差.

为了使GECAM定位精度达到最佳,我们在地面定位算法中采用了极大似然估计,同时对能谱和定位进行联合分析,并以此建立了对伽马暴源的计数分布定位算法.

3.1 GECAM仪器响应和本底

GRD进行能谱测量时,获得的并非真实能谱,而是特定电子学能道下的光子计数.通过仪器响应,可以得到探测器电子学能道计数与实际能谱($f(E)$, 单位: $\text{ph s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{keV}^{-1}$)的关系,即

$$\bar{S}_{d,c} = \int_0^{\infty} f(E) R_d(c, E|\Psi) dE, \quad (1)$$

其中, $\bar{S}_{d,c}$ 表示暴能谱在探测器 d 、能道 c 上的单位时间内沉积光子数期待值, $R_d(c, E|\Psi)$ 表示入射能量 E 的光子在探测器 d 、能道 c 上的响应,与入射光子的方向 Ψ 相关(在载荷坐标系下, Ψ 代表二维参数 θ 和 ϕ).

仪器探测到的对于某次暴发期间的探测器 d 、能道 c 上的单位时间内总沉积光子数期待值 $T_{d,c}$,是本底造成的单位时间内沉积光子数 $B_{d,c}$ 和暴所造成的单位时间内沉积光子数期待值 $\bar{S}_{d,c}$ 之和:

$$T_{d,c} = \bar{S}_{d,c} + B_{d,c} = \int_0^{\infty} f(E) R_d(c, E|\Psi) dE + B_{d,c}. \quad (2)$$

就单个GRD而言,其仪器响应仅与方位 Ψ 有关,每个探测器都有着各自不同的仪器响应. GECAM两颗卫星总共有50个GRD,即 $N_d = 50$.在实际应用中,通常也将入射光子能量 E 划分为 N_E 个首尾相连的离散区间,探测器的电子学能道数为 N_c ,因而仪器响应呈现为 $N_E \times N_c$ 的矩阵.

GECAM各探测器的仪器响应使用Geant4软件基于蒙特卡罗模拟获取, Geant4是用于模拟物质中粒子作用的软件包,已广泛用于高能物理和空间科学中^[12].在Geant4程序中,给定GECAM载荷、卫星平台的质量模型,可以逐事例模拟入射光子在各GRD中的沉积,从而得到每个GRD的仪器响应.卫星入轨后本底可根据暴发事件前后计数插值得

到,卫星入轨前,在当前的模拟定位中本底也是通过Geant4程序模拟获取.在GECAM载荷、卫星平台的质量模型基础上,进一步根据卫星轨道姿态等给定空间粒子环境,可以模拟获取每个GRD的本底^[13,14].

3.2 伽马暴能谱模型

定位分析中采用了三种伽马暴的模型: Band模型、康普顿模型(即截断幂律谱)和幂律谱模型^[15,16].

Band模型^[15]定义如下:

$$f_{\text{Band}}(E) = A \begin{cases} \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\alpha} \exp\left[-\frac{(\alpha+2)E}{E_{\text{peak}}}\right], & E < \frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{\alpha+2}; \\ \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\beta} \exp(\beta-\alpha) \left[\frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{100 \text{ keV}(\alpha+2)}\right]^{\alpha-\beta}, & E \geq \frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{\alpha+2}; \end{cases} \quad (3)$$

其中,4个模型参数 A , α , β , E_{peak} 分别是归一化常数($\text{ph s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{keV}^{-1}$)、低能谱指数、高能谱指数、 νF_{ν} 峰值能量.

康普顿模型为

$$f_{\text{COMP}}(E) = A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\alpha} \exp\left[-\frac{(\alpha+2)E}{E_{\text{peak}}}\right], \quad (4)$$

其中,3个模型参数 A , α , E_{peak} 分别是归一化常数($\text{ph s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{keV}^{-1}$)、低能谱指数、 νF_{ν} 峰值能量.

幂律谱模型为

$$f_{\text{PL}}(E) = A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\alpha}, \quad (5)$$

其中,2个模型参数 A , α 分别是归一化常数($\text{ph s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{keV}^{-1}$)、能谱指数.

在当前的模拟定位中,三种模型分别独立进行拟合分析.以 Ω 表示模型参数的集合,根据采用模型的不同,参数集可能由2,3,4维参数构成.以上三种模型可以统一用 $f(E, \Omega)$ 表示.结合式(1),来自

方向 Ψ 、能谱参数为 Ω 的伽马暴单位时间内在探测器 d 、能道 c 所沉积的光子期待值 $\bar{S}_{d,c}$ 可以表示为

$$\bar{S}_{d,c}(\Psi, \Omega) = \int_0^{\infty} f(E|\Psi, \Omega) R_d(c, E|\Psi) dE. \quad (6)$$

3.3 计数分布定位分析

我们采用极大似然估计, 同时拟合暴的能谱参数和方位参数. 一段时间 t 内, 探测器 d 、能道 c 实际所记录的光子数 $\lambda_{d,c}$ 符合泊松分布, 即

$$\begin{aligned} p(\lambda_{d,c}; \Psi, \Omega) &= \frac{(T_{d,c}t)^{\lambda_{d,c}} e^{-T_{d,c}t}}{\lambda_{d,c}!} \\ &= \frac{[(\bar{S}_{d,c} + B_{d,c})t]^{\lambda_{d,c}} e^{-(\bar{S}_{d,c} + B_{d,c})t}}{\lambda_{d,c}!}. \end{aligned} \quad (7)$$

探测器 d 在方向 Ψ 、能谱 Ω 下的概率密度可以表示为

$$p_d(\Psi, \Omega) = \prod_{c=1}^{N_c} \frac{(T_{d,c}t)^{\lambda_{d,c}} e^{-T_{d,c}t}}{\lambda_{d,c}!}. \quad (8)$$

当泊松分布期望值大于等于20时可以较好地高斯近似, 对于高的计数, 可以将式(8)进行高斯近似从而提高计算效率, 此时式(8)可以被简化为

$$p_d(\Psi, \Omega) = \prod_{c=1}^{N_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{d,c}} \exp\left(-\frac{[\bar{S}_{d,c} - S_{d,c}]^2}{2\sigma_{d,c}^2}\right), \quad (9)$$

其中, $S_{d,c}$ 表示探测器 d 、能道 c 的单位时间内观测计数, $\sigma_{d,c}$ 表示探测器 d 、能道 c 下的统计误差(考虑了本底估计).

因而可以构造似然函数 $L(\Psi, \Omega)$,

$$L(\Psi, \Omega) = \prod_{d=1}^{N_d} p_d(\Psi, \Omega). \quad (10)$$

综合式(2)–(10), 可以直接计算出不同暴在不同能谱参数、方位参数下的似然函数值, 拟合伽马暴的方位参数 Ψ 和能谱参数 Ω , 从而得到定位结果及定位误差.

4 模拟分析

我们使用基于第3节中算法所建立的地面定位程序对GECAM的定位能力进行了模拟分析. 模拟

的内容分为两部分: (1) 假定暴相关的某些参数已知, 研究其他参数对于定位精度的影响; (2) 针对特殊的事件进行模拟定位. 以下分别对两方面的结果进行介绍.

4.1 定位精度与暴参数的关联分析

在3.2小节中我们介绍了三种模型, 由于Band模型在特殊情形下可以化归为其余两种模型^[15], 并且影响定位能力的主要是暴的能谱硬度、亮度、仪器响应、本底, 因而统一采用了Band模型进行模拟定位. 表1中给出了三种典型硬度的Band谱参数, 在谱形参数 $\alpha, \beta, E_{\text{peak}}$ 确定的情况下, 归一化常数 A 正比于通量(Flux).

我们模拟了GECAM来自不同方向的中等亮度(10–1000 keV能段下, 通量为 $10^{-6} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 持续10 s)暴的定位. 图1中展示了GECAM对于来自不同方向的三种硬度谱的定位能力. 图中结果表明, GECAM对于软谱暴定位精度比硬谱暴更好, 这是由于高能光子($> 100 \text{ keV}$)在仪器中的作用更为复杂, GECAM在软谱能段内有较好的探测效率等. 在载荷坐标系下, $\theta \sim 45^\circ$ 和 $\theta \sim 135^\circ$ 且双星相位差 180° 时, 仅有一颗星可以看到暴, 并且此时有效面积相对较小, 因而定位误差要相对来说更大一些.

图2(a)是三种硬度暴的定位精度与累积通量、持续时间关系, 图2(b)是定位精度与通量、持续时间关系. 累积通量一定时, 持续时间越长暴越弱, 定位精度越差. 通量一定时, 持续时间越长累积光子数越多, 计数误差越低, 所以定位精度越高.

从第3节的计数分布定位算法中可以看出, 暴在计数分布定位中的可变参数主要分为能谱硬度(由参数 $\alpha, \beta, E_{\text{peak}}$ 决定)、通量(与归一化参数 A 相关)、积分时间、天区位置, 通过图1和2所示的综合模拟,

表1 三种典型硬度谱的参数

Table 1 Parameters of three typical hardness spectra

Model	α	β	E_{peak} (keV)
软谱	-1.9	-3.7	70
中等谱	-1.0	-2.3	230
硬谱	0.0	-1.5	1000

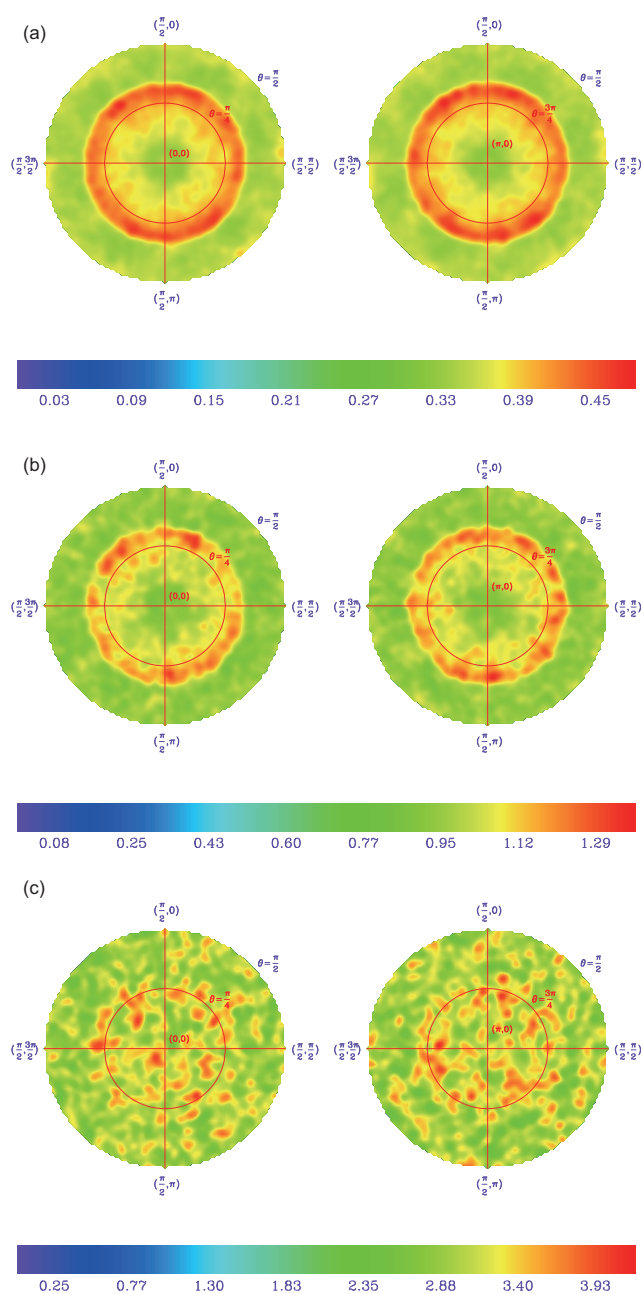


图 1 GECAM对三种硬度谱、不同方向暴的定位精度. (a)–(c)分别是软谱、中等谱、硬谱暴在不同方向时的定位精度. 每个子图中, 左半部分和右半部分展示了两个半天区的定位精度基本一致. 颜色柱的数值代表的是对于暴的定位统计误差(单位: deg)

Figure 1 The GECAM all sky localization accuracy for three typical Band’s GRB spectra. Panels (a)–(c) are for the soft, medium and hard Band’s GRB spectra, respectively. For each panel, the left and right halves show the localization accuracy of the two half-skies that are basically consistent with each other. The color bar refers the statistic errors in the above panels (unit: deg).

大致给出了GECAM对于各种情形下伽马暴的定位精度.

4.2 特殊事件模拟定位

对重要高能辐射暴发现象的全天监测是GECAM的重要科学目标, 定位暴发事件所在天区位置, 对证认与引力波、快速射电暴、磁星暴发等特殊事件的关联, 引导地面及空间天文观测设备的后随观测具有重要的科学意义. 以快速射电暴FRB 131104的高能辐射候选体^[17]及引力波事件GW170817的高能电磁辐射对应体^[2–4]为例, 我们模拟了GECAM对于特殊暴发事件的定位.

文献^[17]报道在Swift卫星数据中发现了与快速射电暴FRB 131104关联的高能辐射候选体(置信度 3.2σ), 并利用BAT数据分析了此疑似的快速射电暴对应体. 文献^[17]得到了此候选体累积通量为 $4.0 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2}$, 持续时间300 s, 采用了幂律谱式(5)进行拟合, 得到最佳拟合参数为 $A=5.8 \times 10^{-4} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1}$, $\alpha=-1.16$. 为了考察GECAM对于此等强度暴的能谱探测能力, 累积通量、持续时间保持不变, 假设一个典型中等硬度Band谱(如表1中所定义)进行分析. 针对如前所述的幂律谱和中等硬度Band谱, 将Swift/BAT对伽马暴的探测结果、伽马暴的性质(能谱形状、暴的亮度、持续时间)作为设定值模拟了GECAM定位分析, 与BAT的对比如表2所示.

表 2 GECAM与BAT对于疑似FRB对应体的探测对比^{a)}

Table 2 Comparison of GECAM and BAT detection for suspected FRB counterpart^{a)}

模型	参数	初值	BAT误差	GECAM误差
幂律谱	定位		0.11° &	4.3°
	A	5.8×10^{-4}	2.6×10^{-4} #	2.0×10^{-5}
	α	-1.16	$(-0.78, +0.68)$	0.02
Band谱	定位		0.11° &	5.4°
	A	8.7×10^{-4}	–	1.4×10^{-4}
	α	-1.0	–	0.11
	β	-2.3	–	**
	E_{peak}	230	–	89.7

a) **表示无法限定; &表示BAT定位误差为90%置信度, #表示文章中未直接提供而根据其他参数计算, A 的单位是 $\text{ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1}$, E_{peak} 的单位是keV

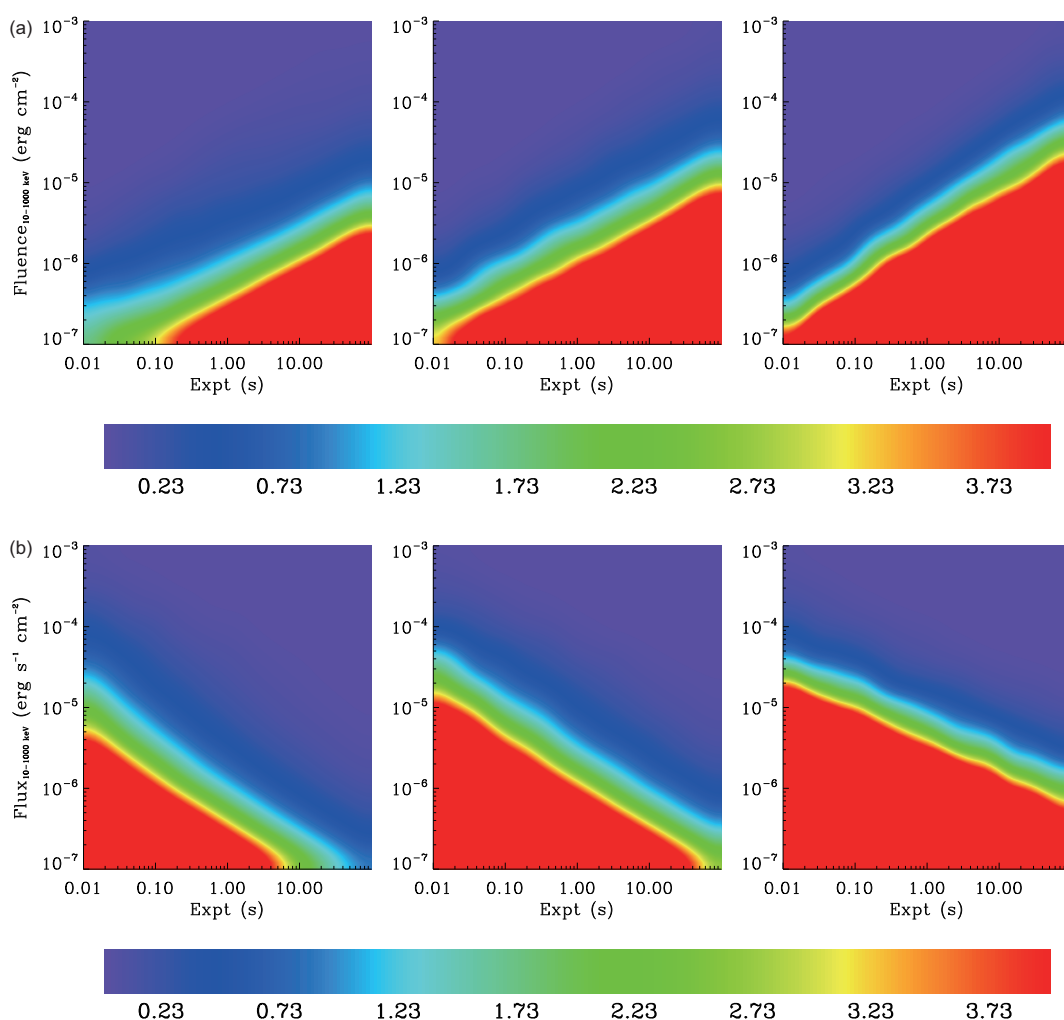


图 2 (a) 累积通量-持续时间的定位误差2维分布. 从左至右依次是软、中、硬典型Band谱. (b)与(a)相同, 但表示的是通量-持续时间的定位误差

Figure 2 (a) The 2-D distribution of the localization error with the fluence and duration for the soft, medium and hard Band's GRB spectra. (b) The same as Panel (a), but with the flux and duration.

对于GRB 170817A, 我们使用文献[3, 18]以及GCN 21528^[19]中所提供的能谱参数拟合最佳值进行了定位能力模拟. 如表 3所示, 对于GRB 170817A而言, GECAM进行的能谱拟合结果表明, GECAM对于此暴的能谱参数统计误差普遍好于Fermi/GBM所给出的结果. 图 3(a)和(b)分别是表 3中第3时间段($-0.320 \text{ s} \rightarrow +0.256 \text{ s}$)和第4时间段($+0.832 \text{ s} \rightarrow +1.984 \text{ s}$)的GECAM模拟能谱拟合. 30° 入射和 90° 入射的情形下, GECAM对于此暴的全能段信噪比分别是10.5和12.7. 表 4和图 4是模拟的定位结果. GECAM对于引力波电磁对应体GRB

170817A的定位误差比Fermi/GBM所得到的定位误差要小, 图 4中GECAM的定位置信区间上方有着“截断”, 这是因为地球掩食提高了定位能力.

5 讨论

当前的定位模拟采用的是Geant4模拟的本底和仪器响应, 模拟定位的准确性会在一定程度上受到本底、仪器响应的影响. 我们对GECAM本底进行了大量仿真研究, 根据此前国内外天文卫星本底模拟的经验, 卫星入轨后的实际本底与地面仿真结果

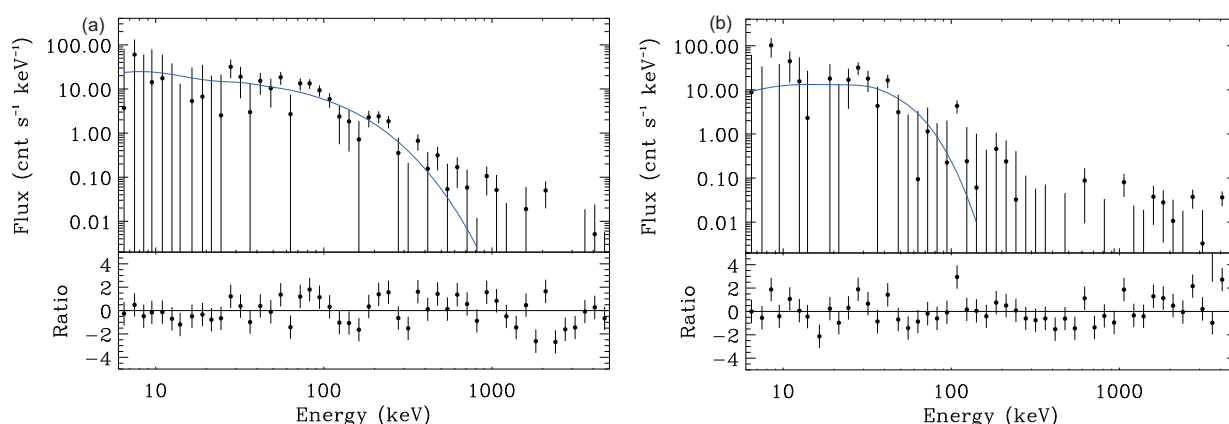


图3 (a) 表3中第3时间段(-0.320 s--+0.256 s)的GECAM模拟能谱拟合, 采用康普顿谱模型. (b) 表3中第4时间段(+0.832 s--+1.984 s)的GECAM模拟能谱拟合, 采用黑体谱模型

Figure 3 (a) GECAM simulative spectral fitting with the parameters of the third group (-0.320 s--+0.256 s) in Table 3 with the Comptonized model eq. (4). (b) GECAM simulative spectral fitting with the parameters of the fourth group (+0.832 s--+1.984 s) in Table 3 with the Black Body model.

表3 GECAM与GBM对于GW170817对应体的能谱探测对比^{a)}

Table 3 Comparison of GECAM and GBM for the spectral detection of GW170817 counterpart^{a)}

参数来源	T_{start} (s)	T_{end} (s)	康普顿模型	黑体模型
文献[3]	-0.192	+0.064	$E_{peak} = 215 \pm 54$ (22) $\alpha = 0.14 \pm 0.59$ (0.40) Fluence = 1.40 ± 0.30 (0.14)	
	-0.128	-0.064	$E_{peak} = 229 \pm 78$ (30) $\alpha = 0.85 \pm 1.38$ (1.00) Fluence = 0.50 ± 0.20 (0.08)	
	-0.320	+0.256	$E_{peak} = 185 \pm 62$ (26) $\alpha = -0.62 \pm 0.40$ (0.25) Fluence = 1.80 ± 0.40 (0.19)	
	+0.832	+1.984		$kT = 10.3 \pm 1.5$ (1.3) Fluence = 0.61 ± 0.12 (0.09)
文献[18]	-0.26	+0.57	$E_{peak} = 158.1^{+180.4}_{-33.7}$ (22.1) $\alpha = -0.66^{+0.38}_{-0.54}$ (0.25) Fluence = 1.40 ± 0.30 (0.14)	
	+0.95	+1.79		$kT = 10.82^{+2.65}_{-1.65}$ (1.3) Fluence = 0.53 ± 0.002 (0.08)

a) 括号内为GECAM的测量误差, 表中参数单位为: E_{peak} 是keV, Fluence是 10^{-7} erg cm^{-2} ; kT 是keV

差异不大(例如, *Insight-HXMT*仿真本底与在轨实际本底差异在15%以内^[20,21]). 我们在地面对探测器响应进行全面、准确的标定测量, 且卫星入轨后将对仪器响应进行在轨标定检验, 但仪器响应与真实响应间仍有可能存在差异. 因此, GECAM在轨时的定位结果可能与当前模拟略有差异.

GECAM两颗卫星位于同一轨道面、轨道高度, 且轨道相位相差 180° , 这样的方案使得GECAM能够真正全天监测伽马射线暴, 并且双星的设计可以使得地球掩食提升定位精度(图4).

值得指出的是, GECAM的定位方案跟光学成像设备有本质的不同, GECAM记录每个入射光子的

表4 GECAM与GBM对于GW170817对应体的能与定位参数探测对比

Table 4 Comparison of parameters between GECAM and GBM detection for GW170817

参数来源	参数	GBM结果	GECAM误差(30°入射)	GECAM误差(90°入射)
GCN21528 [19]	定位误差	17.4°	10.3°	9.2°
	E_{peak}	128.0±48.7	24.1	19.1
	α	0.88±0.44	0.24	0.17
	Fluence	2.2±0.5	0.26	0.21

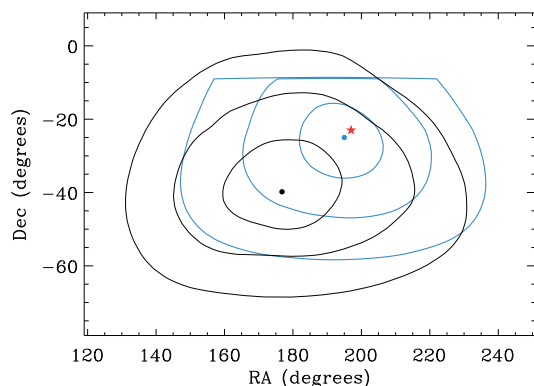


图4 GECAM(蓝色)与GBM(黑色)的定位对比, 圆点为各自的定位位置, 从内到外三个圈分别为1- σ , 2- σ , 3- σ 置信区间; 红五角星是GW170817的光学对应体坐标

Figure 4 Comparison between the location capabilities of GECAM (blue) and GBM (black). For both instruments, the dots are the locations, and the three circles from inside to outside are the 1- σ , 2- σ , 3- σ confidence intervals, respectively. The red pentagram is the optical counterpart location of GW170817.

时间和能量, 同时星敏将给出每秒卫星在惯性系下的指向, 因此定位算法可校正卫星转动效应. 卫星转动可以拆分为绕地球转动和卫星自转, 卫星绕地球转动速度约0.07°/s, 卫星绕z轴自转速度约为0.3°/s, 对于持续10 s的伽马暴, 我们模拟了以1 s时标校正转动效应和未校正转动效应的定位. 结果表明, 由于10 s内J2000系下的平均仪器响应与10 s时间中间时刻的响应差别很小, 未校正转动效应的定位精度与校正转动效应的定位精度差异小于0.5°. 对于持续时间较长的暴, 我们将校正转动效应, 从而给出更为精确的定位.

使用数传数据定位时, 我们可以直接使用电子学能道数据进行定位, 也可进行能道合并, 模拟表明, 合并后的能道数为GECAM电子学能道数的1/3时定位精度差异不大. 短报文数据量较小, 不能

兼顾能量分辨与时间分辨, 短报文下传的主要是不同时间分辨、较长时段的数据. 目前已经设计短报文数据只有一个能道, 对应的能量范围为4 keV–2 MeV (默认值, 在轨可调), 利用短报文数据定位的方案与星上定位类似. 由于星上定位时难以自动化选择最佳时段进行定位分析, 短报文定位可以补充星上定位在时间维度上的数据选择.

Swift/BAT采用编码孔设计, 探测器平面由32768块碲锌镉晶体(CdZnTe)构成, 并在探测器平面之上1 m处置放着划分为约50000片的编码板[22]. 基于上述大规模的探测器, 并应用编码板成像原理, Swift/BAT达到0.1°的定位精度, 超过GECAM和Fermi/GBM这类全天监测器. Fermi/GBM与GECAM采用类似的非成像晶体探测器设计, Fermi/GBM由12个NaI晶体探测器和2个BGO晶体探测器组成[23], 这样的探测器构造、布局与GECAM类似. 但GECAM采用了同轨双星方案, 且每颗星有着不同指向的25个GRD, 因此通常而言GECAM定位能力优于Fermi/GBM, 如表4所示.

6 结论

2017年8月17日, LIGO-Virgo观测到了引力波事件GW170817, Fermi/GBM与INTEGRAL SPI-ACS独立观测到了引力波事件GW170817的电磁对应体GRB 170817A, 意味着多信使天文观测时代的开启. GECAM作为能够全时全天宽波段监测伽马射线暴的天文卫星, 将会在引力波对应电磁体观测中发挥重要作用. 对于疑似引力波对应电磁体的定位将是证认伽马暴与引力波事件关联的关键之一. 我们采用能谱、位置同时拟合的方案建立了GECAM的计数分布定位算法, 该定位算法将能

够精确有效地对伽马射线暴进行定位. 在建立了定位算法后, 我们通过模拟对GECAM的定位能力作了全方面的分析.

在伽马暴的亮度、持续时间保持不变的情形下, GECAM对于伽马暴定位精度与谱形硬度相关, 通常而言对于软谱的定位精度更高; 在伽马暴的谱形保持不变(以典型软、中、硬谱为例)的情形下, GECAM定位能力与暴的通量(或累积通量)、持续时间相关, 通量一定时, 持续时间越长定位精度越高. 对于中等亮度(10–1000 keV能段

下, 通量为 $10^{-6} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 持续10 s)的典型中等硬度谱, GECAM的定位精度在 0.6° ($1-\sigma$ 统计误差)左右.

对于特殊事件: 模拟了GECAM对于快速射电暴FRB 131104的伽马射线候选体的定位, Swift/BAT对此事件定位误差为 0.11° , GECAM对于此事件定位误差在 5° 左右; 模拟了GECAM对于引力波事件GW170817的电磁对应体GRB 170817A的定位, Fermi/GBM对此事件定位误差为 17.4° , GECAM对此事件定位误差在 10° 左右.

参考文献

- 1 Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin. *Astrophys J*, 1973, 182: L85
- 2 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L13
- 3 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
- 4 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
- 5 Lv P, Xiong S L, Sun X L, et al. A low-energy sensitive compact gamma-ray detector based on LaBr_3 and SiPM for GECAM. *J Inst*, 2018, 13: P08014
- 6 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]
- 7 Mazets E P, Golenetskii S V. Recent results from the gamma-ray burst studies in the KONUS experiment. *Astrophys Space Sci*, 1981, 75: 47–81
- 8 Berlato F, Greiner J, Burgess J M. Improved Fermi-GBM GRB localizations using BALROG. *Astrophys J*, 2019, 873: 60
- 9 Pendleton G N, Briggs M S, Kippen R M, et al. The structure and evolution of LOCBURST: The BATSE burst location algorithm. *Astrophys J*, 1999, 512: 362–376
- 10 Connaughton V, Briggs M S, Goldstein A, et al. Localization of gamma-ray bursts using the Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys J Suppl Ser*, 2015, 216: 32
- 11 Burgess J M, Yu H F, Greiner J, et al. Awakening the BALROG: Bayesian location reconstruction of GRBs. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 476: 1427–1444
- 12 Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4-A simulation toolkit. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2003, 506: 250–303
- 13 Zhang D L, Li X Q, Xiong S L, et al. Energy response of GECAM gamma-ray detector (GRD) prototype. arXiv: 1804.04499
- 14 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]
- 15 Band D, Matteson J, Ford L, et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I- spectral diversity. *Astrophys J*, 1993, 413: 281
- 16 Gruber D, Goldstein A, von Ahlefeld V W, et al. The Fermi GBM gamma-ray burst spectral catalog: Four years of data. *Astrophys J Suppl Ser*, 2014, 211: 12
- 17 DeLaunay J J, Fox D B, Murase K, et al. Discovery of a transient gamma-ray counterpart to FRB 131104. *Astrophys J*, 2016, 832: L1
- 18 Zhang B B, Zhang B, Sun H, et al. A peculiar low-luminosity short gamma-ray burst from a double neutron star merger progenitor. *Nat Commun*, 2018, 9: 447
- 19 Goldstein A, Veres P, von Kienlin A, et al. LIGO/Virgo G298048—Update on Fermi/GBM GRB 170817A analysis. GCN Circular, 2017, 21528
- 20 Li G, Wu M, Zhang S, et al. Calculation for the space environment background of HXMT. *Chin Astron Astrophys*, 2009, 33: 333–346
- 21 Xie F, Zhang J, Song L M, et al. Simulation of the in-flight background for HXMT/HE. *Astrophys Space Sci*, 2015, 360: 47

- 22 Scott D B. Burst Alert Telescope (BAT) on the Swift MIDEX mission. In: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, San Diego, 2004. 175–189
- 23 Meegan C, Lichti G, Bhat P N, et al. The Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys J*, 2009, 702: 791–804

The localization method of GECAM and simulation analysis

LIAO Jin-Yuan^{1*}, LUO Qi^{1,2*}, ZHU Yue¹, SONG Xin-Ying¹, PENG Wen-Xi¹, XIAO Shuo^{1,2},
LI Gang¹ & XIONG Shao-Lin¹

¹Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM) is scheduled to launch in late 2020. It will monitor the whole sky for gamma-ray transients, such as Gamma-Ray Bursts (GRBs) and high-energy electromagnetic counterpart of gravitational wave events. One of the key scientific capabilities of GECAM is to localize the GRB. In this study, we established a ground localization method for GECAM by simultaneously fitting the spectrum and location of GRB. In addition, with the instrument response and in-flight background simulated using the current GECAM mass model, we examined the localization capability of GECAM. As a result, we derived the relationship between localization accuracy and different parameters of the GRB, such as brightness, spectral hardness, and burst duration. Moreover, for typical brightness (flux 10^{-6} erg s⁻¹ cm⁻² in 10–1000 keV energy range with duration of 10 s) spectrum of medium hardness, the localization accuracy was observed at about 0.6° (1- σ statistical error). We also performed localization for two special bursts: (1) the suspected high-energy counterpart of the Fast Radio Burst (FRB 131104) with the GECAM localization error approximately 5° and (2) the gamma-ray electromagnetic counterpart (GRB 170817A) of the first binary neutron star merger gravitational wave event GW170817, with GECAM localization error of about 10°.

GECAM, localization algorithm, simulation

PACS: 95.75.Pq, 98.70.Rz, 95.55.Ka, 95.85.Pw

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0018](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0018)