GECAM能量响应及在轨本底模拟

郭东亚, 彭文溪*, 朱玥, 李刚, 廖进元, 熊少林, 乔锐, 李新乔, 安正华, 徐岩冰, 杨生, 张大力, 孙希磊

中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049

*联系人, E-mail: pengwx@ihep.ac.cn

收稿日期: 2020-01-17; 接受日期: 2020-04-21; 网络出版日期: 2020-11-11

中国科学院战略性先导科技专项(A类)(编号: XDA15360300, XDA15052700)资助项目

摘要 GECAM卫星的主要科学目标是探测引力波伽马暴及其他高能暂现源, 具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和宽能段覆盖等特点. 本文在构建GECAM整星质量模型的基础上, 通过Geant4模拟得到了GECAM伽马射线探测器(GRD)的能量响应矩阵; 并给出了在轨本底水平、本底能谱结构及组成成分的估计结果. 模拟结果显示相比Fermi/GBM, GECAM不仅视场更大, 而且在低能区具有更大的有效面积. 同时根据在轨本底模拟结果可知: (1) 单个GRD探头的平均在轨本底约为800 cps, 其中宇宙弥散伽马射线本底占主导; (2) 本底谱中存在三个特征峰, 可用于在轨标定探测器的增益.

关键词 伽马暴, Geant4模拟, 能量响应矩阵, 在轨本底

PACS: 98.70.Rz, 95.55.Ka, 07.05.Tp, 98.70.Vc

1 引言

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)是一个以探测引力波伽马暴(GRB)及其他高能暂现源为主要科学目标的太空科学项目, 计划在2020年下半年发射. 该项目由两颗微小卫星组成, 运行轨道为低地球轨道(LEO), 轨道高度为600 km, 倾角为29°, 两颗卫星轨道相位差为180°.

每颗卫星的有效载荷包括25个伽马射线探测器(GRD)和8个荷电粒子探测器(CPD). 如图1所示, 25个

GRD近乎均匀地分布于穹顶舱球壳上. 这样的配置不仅使每颗星能监测除地球遮挡外的所有天区(~70%全天), 而且对各入射方向的接收面积相当. 每个GRD采用 $\phi 76.2 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 溴化镧(LaBr_3)晶体耦合硅光电倍增器(SiPM)读出, 能够实现对8 keV–2 MeV(设计指标, 预期可达6 keV–5 MeV)的高能量分辨探测. CPD中的6个散布在穹顶舱球壳上, 2个安装在电子学舱的+X面板上. CPD采用55 mm $\times$ 45 mm $\times$ 10 mm的塑料闪烁体耦合SiPM读出, 其主要作用是监测空间荷电粒子, 鉴别伽马暴与荷电粒子暴.

GECAM主要技术指标如表1所示. 它具有全天视

引用格式: 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

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, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0015

图 1 GECAM项目(a)和卫星有效载荷(b)
Figure 1 GECAM mission (a) and the satellite payload (b).

表 1 GECAM主要技术指标

Table 1 Main specifications of GECAM

名称	指标
视场	100%全天
探测能区	8 keV–2 MeV
灵敏度	$\sim 2 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
定位精度	$\sim 1^\circ$

场、高灵敏度、良好的定位精度和宽能段覆盖等特性, 将是“多波段、多信使”天文学时代重要的空间高能望远镜之一。

鉴于空间辐射环境的复杂性和地面试验的局限性, 蒙特卡罗模拟常用于空间科学卫星的探测器设计、性能研究、数据分析等方面。如Fermi/GBM通过蒙特卡罗模拟得到仪器的响应矩阵^[1], HXMT(“慧眼”卫星)模拟在轨本底^[2], DAMPE(“悟空”)卫星利用模拟研究数据处理方法, 实现粒子鉴别和能谱重建^[3,4]等。为研究GECAM卫星对伽马暴的观测能力, 本文根据现有卫星方案和有效载荷设计, 建立整星质量模型并通过蒙特卡罗模拟方法得到了各GRD的能量响应矩阵和在轨本底。这些结果目前主要用于评估GECAM的探测能力, 辅助探测器设计, 验证数据分析算法和软件, 进一步完善后将在未来GECAM在轨科学数据分析(在轨标定、位置重建、能谱分析等)中发挥重要作用。

2 能量响应模拟

本项工作的目的是通过计算机建模和蒙特卡罗模拟, 给出任意方向平行光(模拟天体源)入射的伽马射线在GECAM卫星各GRD探头中的沉积能量分布, 即能量响应。这些响应分布的数据经归一化处理, 卷积探测器的电子学响应^[5](如能量分辨率为5.3%@662 keV)后构成的数据库就是GECAM的能量响应矩阵。而根据GRD探测到的伽马射线来源, 又可分为直接响应矩阵和大气反照响应矩阵。前者是伽马光子直接照射在卫星上产生的仪器响应(包括直接进入探测晶体的伽马光子, 以及探测晶体周围其他材料散射或产生的次级粒子); 后者是源光子被地球大气散射后再进入探测器的仪器响应。

2.1 模拟器

Geant4是由CERN开发的蒙特卡罗应用软件包, 可以模拟粒子在物质中的输运过程。本文采用Geant4.10.2版本搭建了GECAM的能量响应模拟器, 具体的模拟框架如图2所示。

开展模拟的第一步是建立质量模型。本文所用质量模型, 如图3所示, 是由GECAM方案阶段CAD设计文件直接转换而成的, 转换精度为0.1 mm。模型中的卫星平台目前只包含了主体结构及部分单机设备, 并将材料等效为铝, 这与真实情况有一定差异, 但保证质量分布基本一致。鉴于卫星平台距离探头较远, 这些

图 2 GECAM能量响应矩阵模拟框架

Figure 2 The architecture of GECAM response simulator.

图 3 GECAM卫星的全质量模型

Figure 3 The mass model of GECAM satellite.

差异对本文的模拟结果影响较小。模拟采用的物理过程是Geant4中的“shielding”预封装物理包, 包含电磁相互作用、强相互作用、衰变、输运等过程; 同时为了使低能端响应更准确, 电磁相互作用过程改用精度更高的EmStandardPhysics_option4预封装物理包。

在真实情况下, 当伽马射线入射到GRD探头内部

晶体时, 晶体原子被电离激发并随后退激产生荧光; 荧光经过光导玻璃进入SiPM后被转换为电信号, 进而被后续的电子学系统记录下来。但Geant4程序只模拟粒子在物质中的作用过程, 并记录在晶体内的沉积能量, 并不模拟荧光光子收集、光电转换及电子学处理等过程。因此, 通过在直接响应矩阵的模拟程序中输入不同能量、不同方向入射的伽马射线, 获得其在各探头中的沉积能量分布后, 还需要进一步结合地面或在轨标定参数(如能量能道关系、能量分辨、能量阈值、探测效率修正等参数)修正每个GRD探头的仪器效应, 才能最终获得真实的探测器响应矩阵。而大气反照响应矩阵首先需要模拟伽马射线经大气散射后达到卫星的分布(能量、空间), 然后与直接响应矩阵进行耦合。直接响应矩阵和大气反照响应矩阵都以FITS格式存储在响应矩阵数据库内, 两者之和就是总的响应矩阵。

实际模拟中只对一些固定的方向开展, 然后通过插值方法(响应矩阵产生器)生成任意方向的响应矩阵。

2.2 直接响应矩阵

为覆盖GRD探头的能区并考虑更高能伽马射线的康普顿散射贡献, 模拟的入射伽马射线的能量范围为5 keV–10 MeV, 并在对数坐标下均匀分成250个能量并道(Bin)。沉积能量的记录范围为2 keV–10 MeV, 也划分为250个能量bin。

为了减少模拟量, 在本次模拟中限制了入射光子束斑大小(只覆盖一个GRD探头), 并挑选了典型位置的GRD探头(GRD01, GRD06, GRD15和GRD24, 安装位置如图3所示)进行模拟. 图4为垂直照射情况下(天顶角 $\theta=0^\circ$, 方位角 $\varphi=0^\circ$, 入射角度定义的坐标系见图1(b))顶部探头GRD01的响应矩阵. 由图4可知, 当入射能量较小时(小于200 keV), 响应矩阵中除全能峰外还存在两个逃逸峰结构(La和Br的逃逸峰); 而当入射能量在几百keV附近时, 主要结构是全能峰和康普顿平台; 入射能量超过1.022 MeV, 则开始出现511 keV的湮灭峰、逃逸峰等结构. 选取图4中入射能量为100 keV的能量bin, GRD01的探测能谱如图5所示. 图5中除全能峰外, 还可以看到La的逃逸峰, 以及反散射峰等结构.

GRD探头在穹顶舱上是分层分布的, 若假定每一层内各探头的响应近似, 则可将GRD01, GRD06, GRD15和GRD24的响应矩阵推广至全部25个探头. 依据全部GRD探头的直接响应矩阵可计算得到GECAM双星的有效面积, 如图6和7所示. 其中图6为对于天顶角为 0° 和 90° 的点源, GECAM双星的有效面积随入射能量的变化曲线. 图7(a)为GECAM的有效面积随入射能量(Y轴, 单位: keV)和入射天顶角(X轴, 单位: $^\circ$)的变化; 图7(b)为Fermi卫星GBM (Gamma-ray Burst Monitor)^[6]的有效面积. 对比可知, (1) GECAM双星能够实现全天区监测, 而GBM无法观测被地球遮挡的天区($\theta>113^\circ$); (2) 对于双星能够同时观测区域($67^\circ<\theta<113^\circ$), GECAM有效面积明显大于GBM; (3) 在低能

图4 垂直照射情况下GRD01的响应矩阵($\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$)
Figure 4 Response matrix for GRD01, normal incidence ($\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$).

图5 100 keV光子垂直入射时, GRD01的探测能谱
Figure 5 Spectrum of GRD01 for 100 keV photon with normal incidence.

图6 GECAM对于天顶角为 0° 和 90° 的点源的有效面积
Figure 6 GECAM effective area for the point source ($\theta=0^\circ$ or $\theta=90^\circ$).

区(<20 keV), GECAM有效面积更高, 探测能力更强.

2.3 大气反照响应矩阵

GECAM主要依靠不同位置的GRD探头接收的源计数率分布或两颗卫星接收到源信号的时间差实现对爆发源的定位. 当天体源产生的光子被地球大气反照后, 会不同程度地增大GECAM卫星各探头的计数率, 进而影响GECAM的定位能力和能谱重建. 为模拟伽马射线在地球大气中的散射过程, 建立了全尺寸的地球大气质量模型. 该质量模型将0–600 km高度的地球大气分为32个不同厚度的同心壳层, 每层的温度、压强、成分和密度等依据半经验地球大气模型NRLMSISE-00^[7]计算出的平均值设定. Geant4模拟的粒子源为一个半径~7000 km的面源, 垂直向下入射并统计600 km轨道高度处被地球大气散射出的伽马射线

图 7 GECAM/GRD (a)和Fermi/GBM (b)的有效面积比较

Figure 7 Comparison of effective area of GECAM/GRD (a) and Fermi/GBM (b).

能量和方向分布, 如图8所示. 图9为100 keV伽马射线被地球大气反照后的能量分布. 以散射后的光子为入射光子, 根据其能量和方向分布, 卷积直接响应矩阵就可以得到最终的大气反照响应矩阵.

图10是垂直照射情况下($\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$)顶部探头GRD01的大气反照响应矩阵. 图11为一个位于天顶方向的伽马暴(对应的Band模型^[8]参数为 $\alpha=-1$, $\beta=-2.3$,

$E_{\text{peak}}=230$ keV)在顶部探头GRD01和底部探头GRD24 (如图3所示)中的直接响应成分和大气反照成分的对比. 进一步统计两种成分的计数可知, 对于GRD01反照成分的占比小于1%, 而对于GRD24, 反照成分计数是直接响应的130%, 反照成分占主导.

大气反照模拟的结果显示反照的影响跟探测器与GRB相对位置关系相关. 在进行伽马暴数据处理时, 必

图 8 GECAM大气反照响应模拟示意图

Figure 8 Atmospheric albedo response simulation of GECAM.

图 9 100 keV光子被大气反照后能量分布

Figure 9 Energy distribution of 100 keV incident photon scattered by the atmosphere.

图 10 垂直照射情况下GRD01的大气反照矩阵($\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$)
Figure 10 Atmospheric albedo response matrix for GRD01, normal incidence ($\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$).

图 11 一个典型GRB在探头中的直接探测能谱和大气反照能谱
Figure 11 Direct detection spectrum and atmospheric albedo spectrum of a typical GRB.

须修正大气反照的影响, 才能保证定位精度和GRB能谱分析精度.

3 在轨本底模拟

3.1 模拟方案

在轨本底是影响GECAM观测灵敏度的重要因素. 在轨本底主要受卫星材料与质量分布, 以及所处空间粒子辐射环境影响, 它的模拟同样是基于Geant4, 其质量模型及物理过程与能量响应模拟相同. 在“慧眼”卫星在轨空间环境模型的研究基础上^[2], 确定了GECAM轨道处各空间粒子成分的入射谱模型. 表2列出

表 2 空间辐射粒子的成分^{a)}

Table 2 Composition of space radiation particles^{a)}

本底成分	名称	入射能区
宇宙弥散伽马射线	CosmicGamma	10 keV–100 MeV
大气反照光子	AlbedoGamma	10 keV–100 MeV
宇宙线电子	CosmicElectron	1 MeV–1000 GeV
宇宙线质子	CosmicProton	10 MeV–1000 GeV
大气和地磁场中的次级电子	AlbedoElectron	1 MeV–1000 GeV
大气和地磁场中的次级正电子	AlbedoPositron	1 MeV–1000 GeV
大气和地磁场中的次级质子	AlbedoProton	10 MeV–1000 GeV
大气反照中子	AlbedoNeutron	0.001 eV–500 MeV
SAA区电子	SAAElectron	40 keV–4.25 MeV
SAA区质子	SAAProton	7 MeV–400 MeV

a) SAA区: 南大西洋异常区, 主要有高能质子和电子. 在轨运行时, GECAM每颗卫星平均有8%的时间经过SAA区.

了本文模拟时主要考虑的空间粒子成分和能量范围.

在轨本底又可分为瞬时本底(Prompt Background)和延时本底(Delay Background). 瞬时本底是指空间粒子直接在探测器中产生的响应; 延时本底则是卫星材料被空间粒子活化, 产生的放射性核素衰变贡献的本底. 由于衰变是一个随机过程, 发生时间与半衰期有关, 具有一定滞后性, 因而称为延时本底. 在处理模拟数据时, 将产生时间大于10 μ s(GRD探头平均时间分辨, 小于该时间间隔的两个事例探头无法分辨, 会被记录成单个事例)的能量沉积归类为延时本底.

3.2 在轨本底能谱

图12所示为GECAM卫星GRD01探头在轨本底的模拟结果, 其中延时本底是GECAM卫星入轨100 d后的平均能谱. 可见, 在轨空间本底中, 低能区(<200 keV)宇宙弥散伽马射线占主导, 高能区(>200 keV) SAA活化本底占主导.

另外, 由于LaBr₃晶体中含有长寿命天然放射性核素¹³⁸La以及杂质²²⁷Ac, 具有本征放射性. 这些放射性核素衰变产生的本底称为内在本底(Intrinsic Background). 试验测得的LaBr₃晶体内在本底谱如图13中蓝色虚线所示^[5]. 将内在本底谱与空间本底叠加, 即总的在轨本底谱. 由图13可知, 20 min的在轨本底谱中含有3个具有一定显著性可用于在轨增益标定的谱峰, 峰

图 12 GRD01的在轨环境本底能谱

Figure 12 On-orbit environment background spectrum of GRD01.

图 13 GRD01的在轨本底能谱(数据累积时间20 min)

Figure 13 On-orbit background spectrum of GRD01 in 20 min.

位分别为37.4, 511, 1470 keV. 其中37.4和1470 keV的谱峰是LaBr₃晶体中¹³⁸La衰变形成的^[9], 而511 keV谱峰则是空间辐射粒子产生的正电子湮灭峰.

3.3 在轨本底计数率

根据GECAM卫星GRD探测器的记录能量范围统计计数率, 如表3所示. 单个探测器的平均本底约为800 cps, 其中宇宙弥散伽马射线占了在轨本底的75%

表 3 不同本底成分的计数率(单位: cps)

Table 3 Counts rate (unit: cps) of different background components

Component	GRD01	GRD06	GRD15	GRD24
CosmicGamma	647.3	640.2	570.8	501.7
AlbedoGamma	20.8	23.8	29.9	31.6
SAAProton_delay	92.3	92.0	91.5	88.4
Intrinsic	93	93	93	93
Total	872.0	867.8	804.6	734.7

以上, SAA区质子活化引起的延时本底约10%, 大气反照光子约3%, 内在本底约10%.

卫星入轨后, 卫星材料不断被空间粒子活化, 活化造成的延时本底将会随时间逐渐升高, 200 d后趋于稳定. 同时GECAM本底具有明显的轨道调制效应, 如图14所示, 这主要由进出SAA区时产生的大量短寿命放射性核素衰变造成的. 考虑轨道调制, 单个GRD探头的本底计数率大约为700–1000 cps.

4 讨论与结论

本文基于构建的GECAM整星质量模型和地球大

图 14 GRD01 的在轨本底计数率随时间和轨道的变化

Figure 14 On-orbit background rate of GRD01 over time and orbit.

气质量模型, 以空间辐射环境模型作为输入, 采用通用的Geant4软件包及相应的物理过程配置, 模拟得到了GECAM的能量响应矩阵和在轨本底. 模拟结果显示,

GECAM不仅具有全天的特性, 而且对于低能伽马射线有较好的探测能力. 在轨本底的模拟结果显示, GECAM卫星GRD探测器的平均在轨本底计数率约为800 cps, 在进出SAA区时活化本底会导致较强的轨道调制效应. 另外, 本底能谱显著性较高的三条特征谱线, 可用于GRD探头的在轨增益标定.

后续的模拟工作还将做以下改进: (1) 考虑溴化镧(LaBr_3)晶体发光非线性效应对能量响应矩阵的影响; (2) 基于GECAM飞行件更新整星质量模型, 入射粒子覆盖整个卫星; (3) 在轨本底的轨道调制模拟还需要考虑天体中亮的X射线或伽马射线源(太阳, Vela, Sco X-1, Cyg X-1等)的贡献; (4) 增加对CPD探测器的模拟.

目前通过单探头试验数据和模拟数据的对比^[10], 本文所用的模拟系统和建模得到了初步验证. 正样探头标定和整星标定试验将于近期开展. 结合GRD地面标定和在轨标定, 模拟系统和建模也将会得到更加充分的验证.

参考文献

- 1 Hoover A S, Kippen R M, Meegan C A, et al. The GLAST Burst Monitor instrument response simulation system. *Il Nuovo Cimento C*, 2005, 28: 797–800
- 2 Li G, Xie F, Zhang J, et al. Introduction to the background study for X-ray collimated telescope (in Chinese). *Prog Astron*, 2015, 33: 233–249 [李刚, 谢斐, 张娟, 等. 准直型空间X射线望远镜本底研究概述. *天文学进展*, 2015, 33: 233–249]
- 3 Ambrosi G, et al. (DAMPE Collaboration). Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. *Nature*, 2017, 552: 63–66, arXiv: 1711.10981
- 4 An Q, et al. (DAMPE Collaboration). Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite. *Sci Adv*, 2019, 5: eaax3793, arXiv: 1909.12860
- 5 Zhang D L, Li X Q, Xiong S L, 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-Acc Spectrom Detect Assoc Equip*, 2019, 921: 8–13
- 6 Meegan C, Lichti G, Bhat P N, et al. The FERMI gamma-ray burst monitor. *Astrophys J*, 2009, 702: 791–804, arXiv: 0908.0450
- 7 Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J Geophys Res*, 2002, 107: SIA 15-1–SIA 15-16
- 8 Band D, Matteson J, Ford L, et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I—Spectral diversity. *Astrophys J*, 1993, 413: 281–292
- 9 Quarati F G A, Khodyuk I V, van Eijk C W E, et al. Study of ^{138}La radioactive decays using LaBr_3 scintillators. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Acc Spectrom Detect Assoc Equip*, 2012, 683: 46–52
- 10 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卫星有效载荷简介. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 129508]

Energy response and in-flight background simulation for GECAM

GUO DongYa, PENG WenXi^{*}, ZHU Yue, LI Gang, LIAO JinYuan, XIONG ShaoLin,
QIAO Rui, LI XinQiao, AN ZhengHua, XU YanBing, YANG Sheng,
ZHANG DaLi & SUN XiLei

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

The Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM) is designed to detect gravitational wave gamma-ray bursts and other high-energy transient sources in the energy range of 6 keV–5 MeV. It has the characteristics of all-sky field of view, high sensitivity, good positioning accuracy and wide band coverage. The mission consists of two satellites with each containing 25 gamma-ray detectors (GRD) and 8 charged particle detectors. In this paper, the energy response matrix and in-flight background of each GECAM detector are obtained by Geant4 simulation. The simulation results show that the GECAM has stronger observation ability than the Fermi/GBM in low-energy range. The average in-flight background of a single GRD is about 800 cps, and there are three characteristic peaks that can be used for on-orbit calibration.

gamma-ray burst, Geant4 simulation, response matrix, in-flight background

PACS: 98.70.Rz, 95.55.Ka, 07.05.Tp, 98.70.Vc

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0015](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0015)