

空间高效多通道反符合探测器系统设计

罗章正¹, 董亦凡¹, 郭东亚², 龚 轲², 刘雅清², 彭文溪², 乔 锐², 王志刚², 张大力²

¹内蒙古工业大学信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特

²中国科学院高能物理研究所, 北京

收稿日期: 2024年2月6日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年3月27日

摘 要

MeV伽马射线天文台(MeV Gamma Ray Observatory, MeVGRO)是目前在研预计实现对MeV能区伽马射线高分辨、高灵敏度探测的大型空间天文望远镜。反符合探测器(Anti-Coincidence Detector, ACD)作为MeVGRO的有效载荷之一, 需要实现带电粒子的高效探测, 从而区分空间带电粒子和伽马射线。本文基于硅光电倍增管(Silicon photomultiplier, SiPM)和ASIC (Application Specific Integrated Circuit), 设计了一款可以应用于空间的反符合探测器样机, 可高效的输出带电粒子的触发信号, 兼具大动态范围测量, 并对其进行了基线噪声测试、动态范围测试和宇宙线测试。测试结果表明该样机工作稳定、性能良好, 实现了动态范围最大到500 pC, 各通道的电子学台阶一致性在1.1%以内, 最小电离粒子(Minimum Ionizing Particle, MIP)的能谱信噪比优于0.2 c.u.。

关键词

反符合探测器, 多通道ASIC芯片, 高探测效率

Design of Space Efficient Multi-Channel Anti-Coincidence Detector System

Zhangzheng Luo¹, Yifan Dong¹, Dongya Guo², Ke Gong², Yaqing Liu², Wenxi Peng², Rui Qiao², Zhigang Wang², Dali Zhang²

¹Inner Mongolia University of Technology, School of Information Engineering, Hohhot Inner Mongolia

²The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing

Received: Feb. 6th, 2024; accepted: Mar. 19th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

The MeV Gamma Ray Observatory (MeVGRO) is a large space telescope currently under develop-

文章引用: 罗章正, 董亦凡, 郭东亚, 龚轲, 刘雅清, 彭文溪, 乔锐, 王志刚, 张大力. 空间高效多通道反符合探测器系统设计[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(2): 220-227. DOI: 10.12677/jsta.2024.122025

ment, aimed at achieving high-resolution and high-sensitivity detection of MeV gamma rays. The Anti-Coincidence Detector (ACD), as one of the effective payloads of MeVGRO, is required to efficiently detect charged particles in order to distinguish them from gamma rays in space. Based on Silicon photomultiplier (SiPM) and Application Specific Integrated Circuit (ASIC), this paper presents the design of a prototype of an Anti-Coincidence Detector that can be applied in space. It can efficiently output triggering signals for charged particles, and has a large dynamic range measurement. The prototype underwent baseline noise testing, dynamic range testing, and cosmic ray testing. The test results indicate that the prototype operates stably and has good performance, achieving a dynamic range of up to 500 pC, with electronic step consistency of each channel within 1.1%, and a signal-to-noise ratio for the Minimum Ionizing Particle (MIP) better than 0.2 c.u.

Keywords

Anti-Coincidence Detector, Multi-Channel Application Specific Integrated Circuit, High Detection Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

空间中伽马射线的探测, 作为宇宙中极端事件的独特探针, 可以深入了解超新星爆发、活动星系核、黑洞、伽马脉冲星、暗物质等宇宙事件, 从而加深了对宇宙构成、星体演化和宇宙线的起源等的理解。国际上对伽马射线的各个能段的观测中, 康普顿伽马射线天文台(CGRO) [1]、敏捷号伽马射线天文卫星(AGILE) [2]、费米伽马射线太空望远镜(Fermi-LAT) [3]、阿尔法磁谱仪(AMS-02) [4]、暗物质粒子探测卫星(DAMPE) [5] [6]等项目的探测器载荷中都包含了反符合探测器。其中中低能段和超高能段观测成果略少[7], 在国际上的空间伽马射线天文望远镜中, 只有 CGRO 的康普顿成像望远镜(COMPTTEL)以中能段为主要探测能区。国内因此于 MeV 伽马射线天文台的提出, 正是瞄准了我国空间伽马射线天文的“空缺”波段。

MeVGRO 是一个可实现对 0.3~100 MeV 伽马射线能谱、时变、偏振及成像等高灵敏度、全参数、大视场观测的大型空间天文望远镜。MeVGRO 的有效载荷由硅径迹探测器(GCK)、低能量能器(LECA)、高能量能器(HECA)、反符合探测器(ACD)、暴发检测器(CBM) 5 种探测器组成。如图 1 所示, GCK、LECA、HECA 位于望远镜内部, ACD 从 5 面进行包围, 紧密的覆盖量能器。因此 ACD 采用 SiPM 耦合在塑闪表面, 塑闪可以全面包围量能器。除了覆盖率的要求, ACD 需要较高的带电粒子探测效率, 对最小电离粒子(MIP)的电荷分辨需满足 <0.2 c.u.。

反符合探测器通常使用物质质量较轻(如塑料闪烁体)的探测器, 其对宇宙线中的带电粒子探测效率较高, 而伽马光子几乎不会产生能量沉积, 因此通过有无能量沉积信号, 即可实现对宇宙线带电粒子事例和伽马光子的区分识别。塑闪探测器发出的光子, 通常由光电倍增管转换为电信号进行收集。由于空间中的质子通量比伽马射线通量大四个数量级, 需要在受限的空间中, ACD 尽可能的覆盖伽马探测器, 而硅光电倍增管(SiPM)由于其小体积(毫米量级的尺寸)、低电压(低于百伏)、高光子探测效率(客座单光电子探测)、高增益($10^5 \sim 10^7$)和不受磁场影响等特性, 开始在空间项目中应用, 比如 GECAM 卫星的 GRD 和 CPD 探测器[8]。

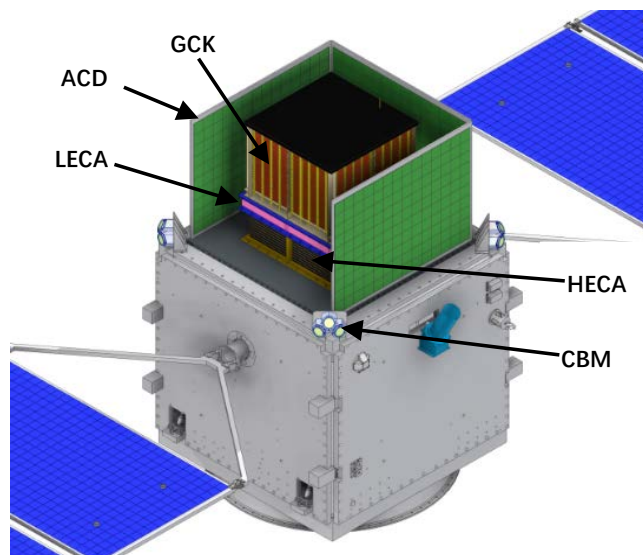


Figure 1. MeVGRO payload diagram
图 1. MeVGRO 有效载荷示意图

本文设计的 ACD 基于塑闪和 SiPM 组成塑闪单元，塑闪单元密切排列，达到对核心探测器的覆盖。对于近千路的 SiPM，采用专用 ASIC 进行电信号的收集。为了实现 ACD 的上述功能实现可行性，本文对选用的具有触发输出的 ASIC 进行了性能评估；同时设计了一套反符合探测器，实现了 ASIC 芯片采集塑闪单元信号，并通过宇宙线测试验证了其电荷分辨性能。

2. 反符合探测器单元的结构

反符合探测器的结构示意图如图 2 所示，由塑料闪烁体和 SiPM 两部分组成一个探测单元模块。塑料闪烁体采用的是 ELJEN 公司生产的 EJ-200 [9]。该材料的参数为：光输出 64% (相对于蒽)，闪烁效率 10,000 光子/1 MeV e⁻，最大发射波长 425 nm，光衰减长度 380 cm，上升时间 0.9 ns，衰减时间 2.1 ns，半高宽 2.5 ns，折射率 1.58。在塑料闪烁体的两端耦合 SiPM 用于闪烁光子的读出，SiPM 使用的是滨松公司生产的 S13360-6050CS [10]，有效感光面积 6 mm × 6 mm，像素间距 50 μm，击穿电压(Vbr)为 53 ± 5 V，推荐工作电压为 Vbr + 3 V，光谱响应范围 270~900 nm，波长峰值 450 nm，像素点个数 14,400。

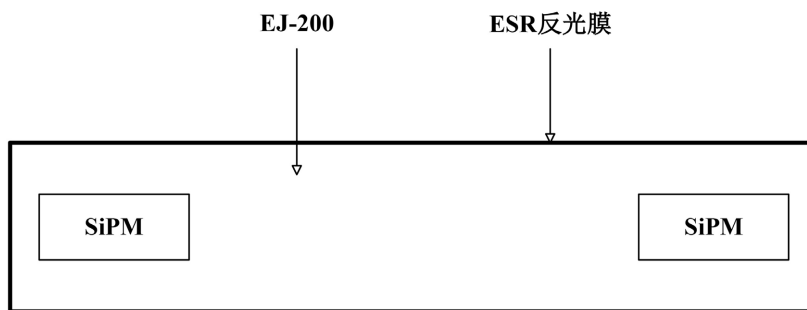


Figure 2. Anti-coincidence detector unit schematic
图 2. 反符合探测器单元结构图

为了提高闪烁光的收集效率，在塑料闪烁体表面包裹了一层 ESR 反光膜，该反光膜对于可见光波段的光子能够达到 98% 以上的反射效率，可以显著地降低闪烁光子在包裹材料表面多次反射吸收而导致光

收集效率降低。

3. 反符合探测器读出电子学系统

反符合探测器的读出电子学系统框架如图 3 所示, 主要由 ACD、ASIC、模数转换器(ADC)、FPGA、PC 上位机组成。

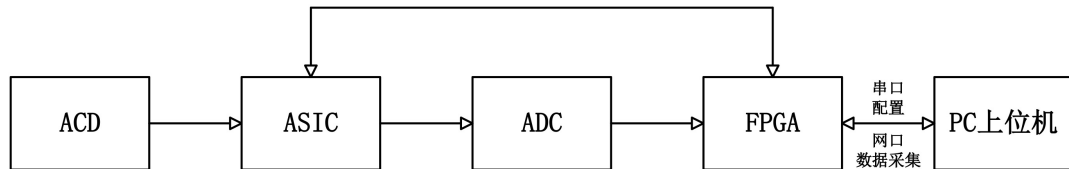


Figure 3. Anti-Coincidence Detector readout electronics framework

图 3. 反符合探测器读出电子学框架

选用的 ASIC 芯片是 WEEROC 公司生产的 Citiroc 1A [11]。Citiroc 1A 是一款拥有 32 通道并且专用于读出 SiPM 信号的前放 ASIC, 它具有大动态范围、单独触发通道、低噪声、低功耗等特点。该 ASIC 芯片触发阈值低至 1/3 光电子, 动态范围 0~400 pC, 接通的电源电压为 3.3 V 时功耗低至 225 mW。同时由于 SiPM 对温度比较敏感, 温度的变化会导致 SiPM 的工作电压发生变化, Citiroc 的前放电路可以通过片内集成的 8 bit DAC 进行高压调节, 来校正 SiPM 的增益和噪声不均匀性。其内部电路图如图 4 所示, 主要由前放电路, 电荷测量电路, 触发电路三部分组成。

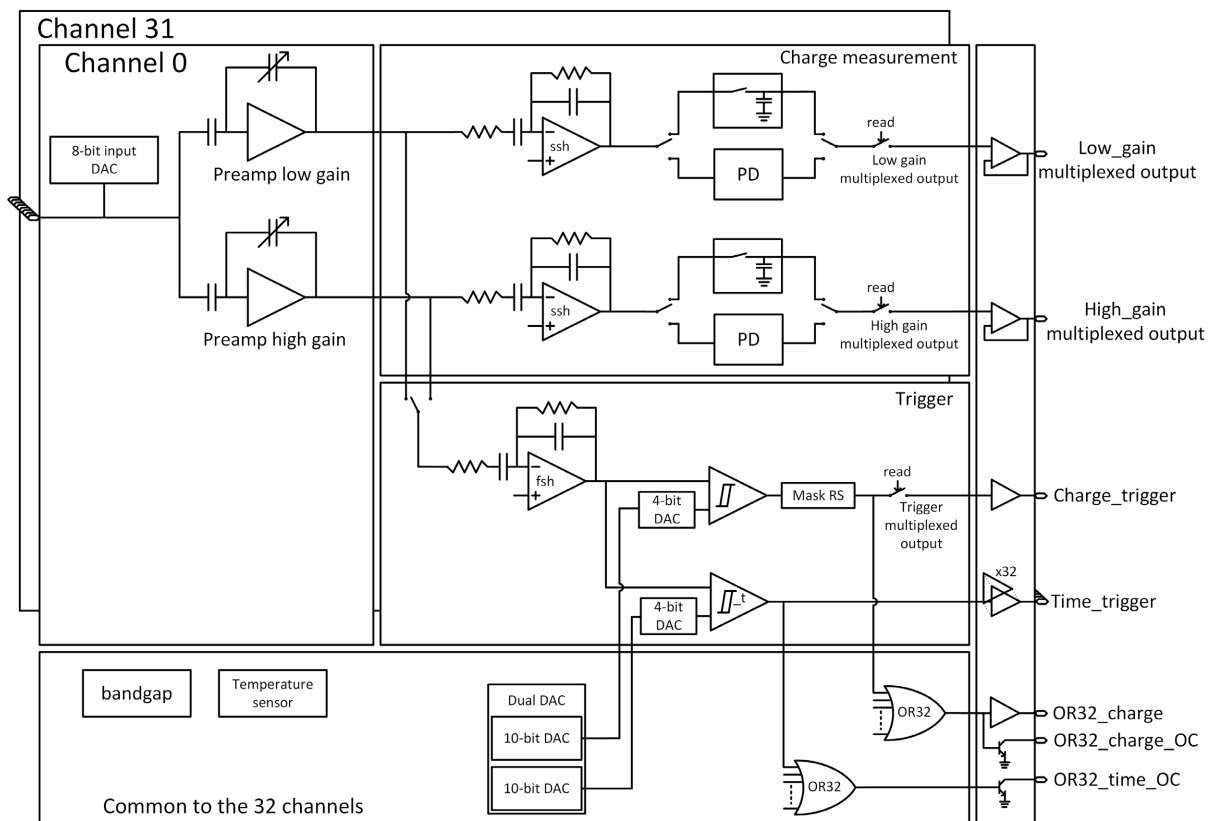


Figure 4. Internal circuit diagram of Citiroc [11]

图 4. Citiroc 内部电路图[11]

当有粒子穿过塑料闪烁体时，会通过激发和电离在塑料闪烁体上产生沉积能量，而这些能量一部分会被吸收转换成闪烁光子。闪烁光子被收集并且通过 SiPM 转换为一个显著的电流脉冲信号传输给 ASIC 芯片。Citiroc 接收到 SiPM 产生的电流脉冲信号后经由前放电路进行积分放大，前放电路有高增益放大器和低增益放大器，两档放大器都为逐通道独立可调增益前置放大器，确保了动态范围的广泛覆盖。在电荷测量电路中，放大后的信号送入慢成形电路中滤波成形，成形时间 12.5 ns~87.5 ns 可调。成形后信号送入峰值采样模块进行采样和保持，最后通过一个多路复用输出串行读出 32 个通道的高增益和低增益模拟电荷测量值。测量的电荷值通过外部 ADC 转换为数字信号并传输给 FPGA 中进行数据打包处理，最后通过网口上传到 PC 进行数据采集。采用的 ADC 是 ADI 公司生产的 AD9220ARZ。AD9220ARZ 是一款采样率 10 MSPS、12 位的 ADC，具有高速采样率和低功耗特性。

触发电路可以选择连接到高增益或低增益前置放大器中，该触发链由快成形电路、时间鉴别器和电荷鉴别器组成。快成形电路固定成形时间 15 ns，两个鉴别器连接到快成形电路的输出端，时间鉴别器进行时间窗口和触发决策的数字处理，当快成形输出信号超过预设的阈值时，电荷鉴别器会产生一个触发信号并通过多路复用输出依次提供 32 个通道的电荷触发信号，PC 上位机可以通过串口进行 FPGA 的功能控制与参数配置。

4. Citiroc 性能测试

4.1. 基线测试

基线测试是为了确定 Citiroc 各通道的噪声基线水平，该测试使用到 Citiroc 的刻度功能，将 32 个通道输入端悬空，使用信号发生器产生 10 kHz 的触发信号，对各个通道的电子学台阶、噪声一致性进行测试。测试结果如图 5 所示，左图 HG 为高增益各通道基线均值，ADC 道数在 890~920 之间，各通道的电子学台阶一致性在 1.1% 以内，随机噪声道数在 3 道以内。右图 LG 为低增益各通道基线均值，ADC 道数在 900~920 之间，各通道的电子学台阶一致性在 0.989% 以内，随机噪声道数在 2 道以内。以上试验证明，该 ASIC 的各通道具有较好的一致性。

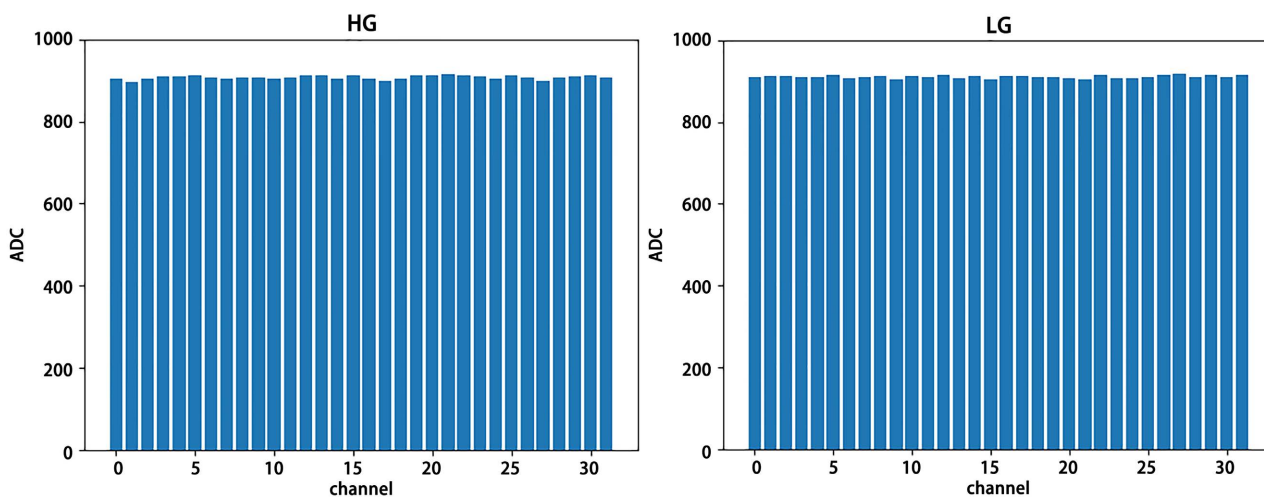


Figure 5. Baseline test results of 32 channels

图 5. 32 个通道基线测试结果

4.2. 线性测试

线性测试可以检验 Citiroc 各通道的工作性能，线性测试是以电荷注入的方式进行，通过改变注入

Citiroc 各通道的电荷量对其线性性能进行测试。线性测试框图如图 6 所示，使用信号发生器输出幅度为 V ，频率为 10 kHz 的脉冲信号，通过一个串联电容 C 给 Citiroc 的各通道注入电荷。

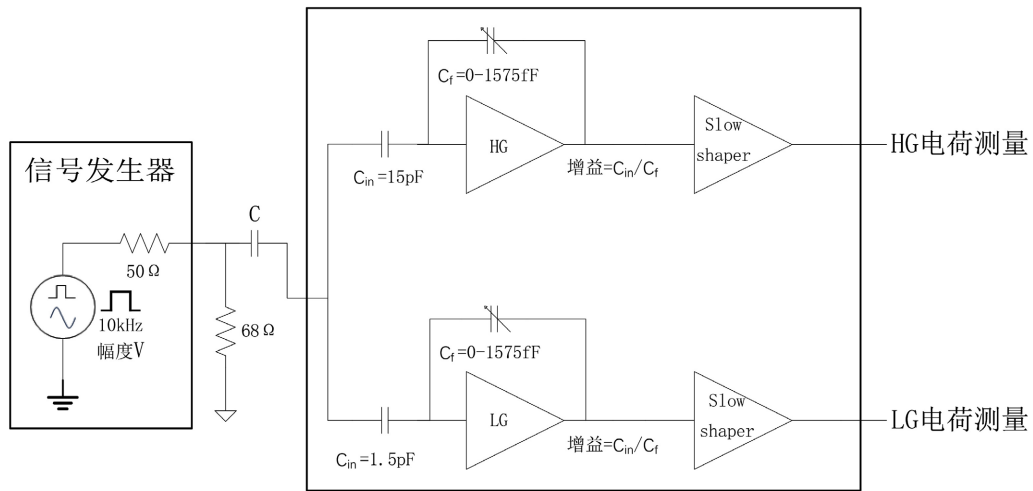


Figure 6. Schematic diagram of linear test
图 6. 线性测试框图

注入的电荷量可以由式 1 计算得出。

$$Q = C \times V \tag{1}$$

其中 C 为串联电容的容值， V 代表注入信号的幅度。两档放大器的增益由 C_{in}/C_f 控制，其中高增益通道 C_{in} 为 15 pF，低增益通道 C_{in} 为 1.5 pF，而 C_f 均为 0~1575 fF (6 bit 可调，步长 25 pF) 可调，通过改变注入的电荷量对 Citiroc 各通道的高增益通道与低增益通道进行线性测试。

图 7 为其中一个通道的线性测试结果，左图为高增益通道线性测试结果，设置的放大增益为 10 倍，在 270 pC 左右达到饱和，对线性区 0~250 pC 范围进行拟合，经计算得到积分非线性好于 1%。右图为低增益通道线性测试结果，设置的放大增益为 1 倍，在 20 pC~500 pC 范围内保持了一个良好的线性关系，对线性区进行拟合，经计算得到积分非线性好于 0.5%。

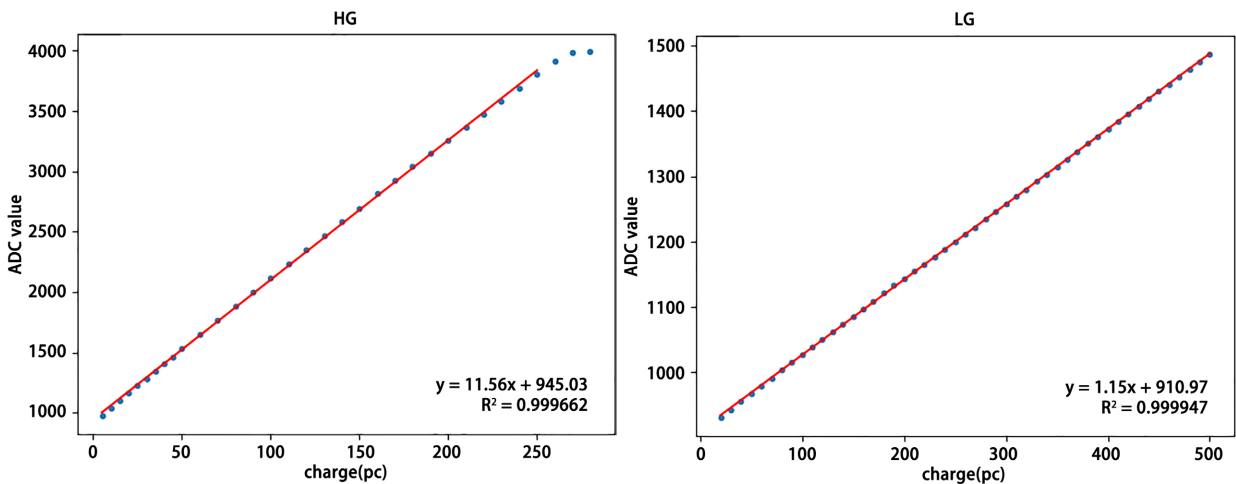


Figure 7. Results of linear test
图 7. 线性测试结果

5. 宇宙线测试测试

为了验证 ACD 的最小电离粒子性能，在实验室搭建了一套宇宙线测试系统。如图 8 所示，将反符合探测器单元的 SiPM 输出端连接至 ASIC 的输入端用于数据读出。在 ACD 顶面与底面放置两块触发塑闪，用于触发穿透 ACD 的宇宙线所产生的沉积能量信号，并接上高压进行供电。将上下两端触发塑闪产生的信号通过 SMB 转 lemo 线缆接入 NIM 机箱，NIM 机箱中的扇入扇出插件将信号反向输出，再通过低阈甄别器将过阈信号转换为 NIM 信号，NIM 信号经过“与”逻辑插件后，从而产生宇宙线事例触发信号并用于读出电子学的外触发信号。当读出电子学部分接收到外触发信号时，即可通过 PC 上位机程序进行 SiPM 的数据采集。

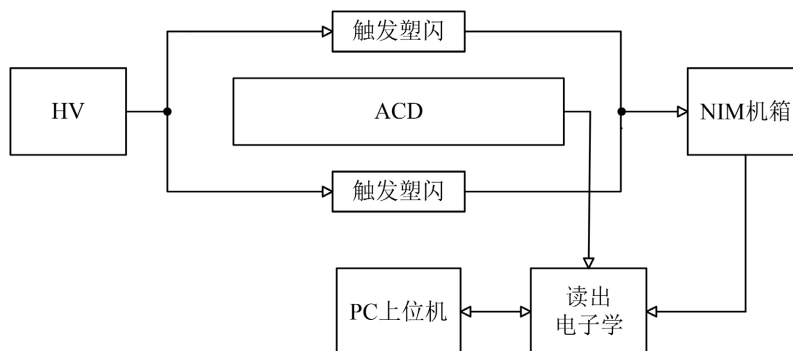


Figure 8. Cosmic ray testing system
图 8. 宇宙线测试系统

宇宙线测试结果如图 9 所示，通过朗道卷积高斯对能谱进行拟合，能谱基线位于 1000 ADC，可得其电荷分辨为 0.12 c.u.。

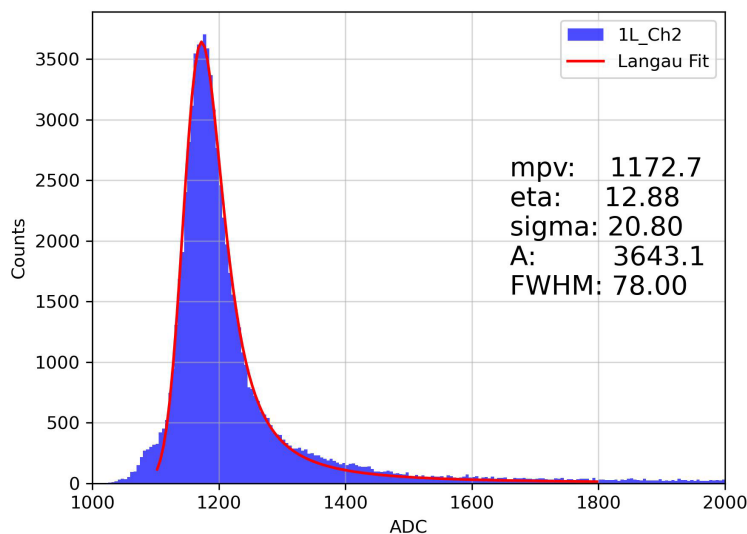


Figure 9. Results of cosmic ray test
图 9. 宇宙线测试结果

6. 结论

本文研制了一款具有触发功能的反符合探测器，并基于 SiPM 和 Citiroc ASIC 芯片设计了反符合探测

器的读出电子学系统, 对其进了一系列性能测试, 并将读出电子学与反符合探测器联调进行宇宙线测试。测试验证该套系统动态范围达到 500 pC, 电子学系统各通道一致性在 1.1% 以内, 积分非线性好于 1%, 联调探测器的带电粒子探测效率为 0.12 c.u.。测试结果表明该反符合探测器系统性能稳定, 动态范围大, 其中大动态范围的设计同时可以拓展 ACD 的电荷测量能力, 电子学通道一致性良好, 电荷分辨好于 ACD 设计所需的 0.2 c.u., 为后续 ACD 的研制奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] Diehl, R. (2010) Gamma-Ray Line Observations with CGRO-COMPTEL. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **759**, 384-387. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1995.tb17568.x>
- [2] Tavanit, M., Barbiellini, G., Argan, A., *et al.* (2009) The AGILE Mission. *Astronomy and Astrophysics*, **502**, 995-1013.
- [3] Abdo, A.A., Ackermann, M., Ajello, M., *et al.* (2009) Detection of High-Energy Gamma-Ray Emission from the Globular Cluster 47 Tucanae with Fermi. *Science*, **325**, 845-848. <https://doi.org/10.1126/science.1177023>
- [4] Tomassetti, N. (2015) AMS-02 in Space: Physics Results, Overview, and Challenges. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, **265-266**, 245-247. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.06.063>
- [5] 杨海波, 孔洁, 赵红赟, 等. DAMPE-PSD 读出电子学研制[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(6): 1124-1131.
- [6] Yu, Y., Sun, Z., Su, H. and Yang, Y. (2017) The Plastic Scintillator Detector for DAMPE. *Astroparticle Physics*, **94**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.06.004>
- [7] 冯思亮, 范鹏, 胡一凡, 等. 伽马天文观测技术综述[J]. 天文学报, 2021, 62(1): 68-83.
- [8] 江环. GECAM 伽马探测器的能量分辨率和响应非线性研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [9] Eljen Technology (2024) General Purpose EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>
- [10] Hamamatsu, K.K. (2024) Photonics, S13360 Series (Datasheet). https://www.hamamatsu.com.cn/cn/zh-cn/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-3050CS.html
- [11] Weeroc (2024) Jean-Baptiste Cizel, Citiroc1A Datasheet V2 53. <https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/citiroc-1a>