

doi: 10.7690/bgzdh.2021.02.010

# 高能伽玛射线数据采集核电子学系统

张锐<sup>1,2</sup>, 朱泓光<sup>1</sup>, 韩强<sup>1</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000;  
2. 绵阳市维博电子有限责任公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为满足闪电高能辐射数据采集的需求, 设计一套基于高能伽玛射线数据获取系统。根据高速采样电子学系统的结构及处理能力, 对模拟信号调理、高速 ADC 和数据分析与控制电路进行设计, 运用电流灵敏前置信号滤波成型、双通道 ADC 采集、能谱与时间谱数据解析等技术, 实现了瞬发高能  $\gamma$  辐射事件实时、准确和可靠筛选。结果表明: 该系统反映了实际需求, 有一定的使用参考价值。

**关键词:** 核电子学; 高速采集; TGFs

**中图分类号:** TL822+.6 **文献标志码:** A

## Nuclear Electronics System for High Energy Gamma Ray Data Acquisition

Zhang Rui<sup>1,2</sup>, Zhu Hongguang<sup>1</sup>, Han Qiang<sup>1</sup>

(1. Department of Intelligent Measurement & Control, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. Department of Intelligent Measurement & Control, Mianyang Weibo Electronic Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of lightning high energy radiation data acquisition, a high energy gamma ray data acquisition system is designed. According to the structure and processing capacity of high-speed sampling electronics system, the analog signal conditioning, high-speed ADC and data analysis and control circuit design, using the current sensitive signals filtering before forming, dual channel ADC acquisition, spectral and time resolution of spectrum data technology, realize the instantaneous high-energy gamma radiation in real-time, accurate and reliable screening events. The results show that the system reflects the actual demand and has certain reference value.

**Keywords:** nuclear electronics; high speed acquisition; TGFs

## 0 引言

探测空间大气伽玛射线暴、闪电伽玛射线暴和人造伽玛射线暴<sup>[1-2]</sup>是空间基础物理学和观测遥感的前沿技术, 具有重要的军事与民用价值。近年, 国家投入大量研发资金开展相关研究, 笔者针对闪电高能辐射数据采集的需求, 设计一种双通道高能伽玛射线数据采集核电子学系统, 实现了某浮空平台对瞬发高能  $\gamma$  辐射事件可靠甄别与实时采集。

## 1 系统总体设计

如图 1 所示, 系统主要由模拟电路、高速 ADC 模块、嵌入式 FPGA+双核 ARM 模块<sup>[3]</sup>和电源模块组成。模拟电路将前置放大器输出信号进行滤波成型与放大; 高速 ADC 模块实现高速、高精度的模拟量到数字量的转换; 嵌入式 FPGA+双核 ARM 模块在内部有一个 ARM 内核进行数据处理和识别, 实时筛选出 TGFs 事件波形数据, 并将结果传输给内部另一个主导通信与控制的 ARM 内核。

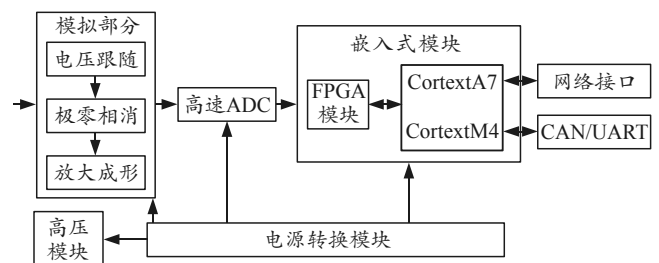


图 1 系统组成

## 2 模拟电路设计与实现

模拟电路的组成如图 2 所示。前放输出的类指数脉冲信号经模拟电路实现滤波和放大成形, 调理后的信号利于 ADC 进行实时采集与分析。在瞬发高能辐射探测模式时, 系统需要采集足够多的本底数据, 才能有效甄别出高能辐射信号。根据系统的处理能力, 适当压缩数据量, 将 ADC 输入信号调理为脉宽约  $2 \mu\text{s}$  的类高斯波形。ADC 的采样率配置为  $20 \text{ MS/s}$ , 即在一个脉宽内约采样 40 点, 可较完整地获得脉冲的幅度信息。

收稿日期: 2020-08-27; 修回日期: 2020-09-28

基金项目: 2019 年四川省重大仪器专项放射性污染一体化复合监测仪研发项目

作者简介: 张锐(1979—), 男, 内蒙古人, 硕士, 高工, 从事核辐射监测技术及机电一体化技术研究。E-mail: dutdaming@126.com。

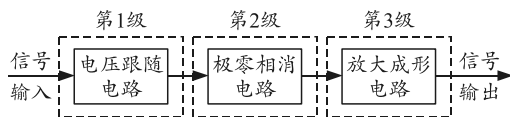


图 2 模拟电路组成

### 2.1 极零相消电路

前放输出电压呈负指数衰减，当信号衰减时间常数较大时（通常为反馈电阻较大引起），会导致波形拖尾严重，从而在计数率较高情况下，易引起脉冲堆积。为减少核脉冲堆积概率，需要调理成较窄的脉冲；因此，设计了如图 3 所示的极零相消电路。

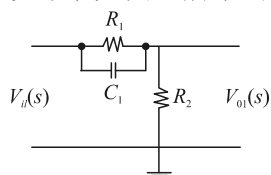


图 3 极零相消电路原理

前放输出信号经射随器缓冲隔离后，其传递函数<sup>[4]</sup>为

$$V_i(s) = \frac{Q}{C_f(s+1/\tau_f)} \quad (1)$$

图 3 中极零相消电路的传递函数为

$$H_1(s) = (s+1/\tau_1)/(s+1/\tau_2) \quad (2)$$

前放输出信号经过极零相消电路后，其输出电压为

$$V_{o1}(s) = \frac{Q(s+1/\tau_1)}{C_f(s+1/\tau_f)(s+1/\tau_2)} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中： $\tau_1=R_1C_1$ ； $\tau_2=R_1R_2C_1/(R_1+R_2)$ 。

由式(3)可知：通过设置合适的零点消去时间常数最大的极点，即  $\tau_1$  与  $\tau_f$  等值，可得到时间常数为  $\tau_2$  的输出脉冲。其输出表达式为

$$V_{o1}(s) = \frac{Q}{C_f(s+1/\tau_2)} \quad (4)$$

### 2.2 滤波放大成形电路

信号经极零相消电路后，核脉冲幅度变小、前沿上升时间较快，需对信号滤波放大成形，从而提高信号增益，并调理为类高斯波形。整形后的信号不仅可提高信噪比，而且利于 ADC 准确采样核信号和关注辐射事件的甄别。如图 4 和图 5 所示，电路分为二级：反向放大 1 阶 LPF（低通滤波器）和 2 阶反相型 LPF，通过该两级有源滤波电路，起到了两级线性放大和 3 个无源 RC 低通滤波器的效果（截止频率 10 MHz 左右），最终实现了将指数衰减脉冲调理为前后沿对称的类高斯信号。

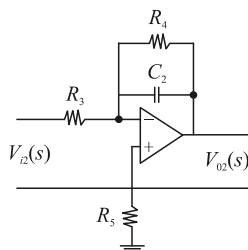


图 4 1 阶反相 LPF

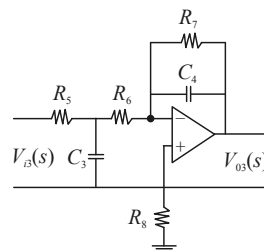


图 5 2 阶反相型 LPF

反向放大 1 阶 LPF 传递函数为

$$H_2(s) = A_1/(1+s\tau_3) \quad (5)$$

式中： $A_1=-R_4/R_3$ ； $\tau_3=R_4C_2$ 。

2 阶反相 LPF 的传递函数为

$$H_3(s) = \frac{A_2}{(1+s\tau_4)(1+s\tau_5)} \quad (6)$$

式中： $A_2=-R_7/(R_5+R_6)$ ； $\tau_4=R_5C_3$ ； $\tau_5=R_7C_4$ 。

### 2.3 模拟电路输出波形

通过式(4)~式(6)，令各时间常数为  $\tau$ ，可以导出模拟电路的输出信号：

$$V_{o3}(s) = \frac{A_1A_2Q}{C_f\tau^3} \frac{1}{(s+1/\tau)^4} \quad (7)$$

令  $\tau=0.2 \mu\text{s}$ ，将式(7)进行拉氏变换后，可得到最终输出的类高斯电压信号时域波形表达式：

$$V_o(t) = \frac{A_1A_2Q}{3!C_f} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 e^{-t/\tau} u(t) \quad (8)$$

## 3 高速 ADC 电路设计与实现

系统支持 2 路 ADC 采集，ADC 选用 Analog 公司 AD9235。该芯片内置采样保持放大器和基准电压源<sup>[5]</sup>，采样精度 12 位，最高采样频率 65 MS/s。

输入信号上升沿约 400 ns，脉宽约 2  $\mu\text{s}$ ，设置 ADC 采样率为 10 MS/s，则单位脉宽内约采样 20 点，其中上升沿约采样 4 点，可较好地获得脉冲幅度信息和上升沿。为节约 FPGA 片上存储资源，兼顾完整采集关注的辐射信号，将 ADC 采样精度设为 8 位。

## 4 嵌入式 FPGA+双核 ARM 电路设计与实现

### 4.1 嵌入式模块

系统需要快速甄别、上传关注事件的连续波形数据或刻度用的能谱数据，对实时性要求较高，需采用 FPGA 芯片主要负责对 ADC 的控制，确保采集功能和性能的实现，并将转换结果送至双口 RAM。系统设计上，选用 Altera 公司 Cyclone IV 系列的 EP4CE10F1718 作为主控芯片，采用

STM32MP157C 微处理器作为主控制 CPU。STM32MP157C 微处理器内部集成有双 ARM 内核，分别为 Cortex-M4 内核和 Cortex-A7 内核。

Cortex-M4 内核运行嵌入式实时操作系统，具有极高的实时性能，能与 FPGA 的双口 RAM 进行高速总线通信，以实时获取 ADC 采样数据，并进行数据预处理，处理后的结果再通过内部总线传输给 Cortex-A7 内核，运行 Linux 操作系统，对 Cortex-M4 内核预处理后的数据进行应用层处理，再把处理结果通过网络传输给终端平台。Cortex-M4 内核与 Cortex-A7 内核各自分工、协同工作，能实现数据实时获取与处理、上位机网络传输等各方面性能的最优化。其架构如图 6 所示。

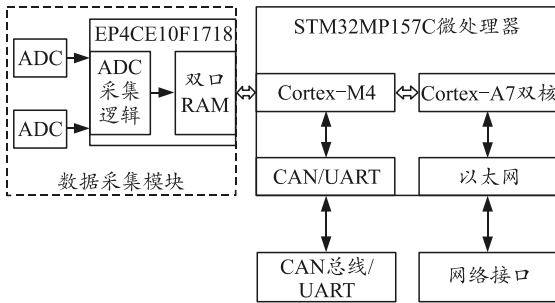


图 6 嵌入式模块功能架构

#### 4.2 嵌入式程序

##### 1) 数据采集模块。

数据采集模块完成 ADC 输出数字信号的采集、辐射事件甄别和脉冲幅度谱合成。打包数据通过总线传给 STM32MP157C 微处理器的 Cortex-M4 内核。模块结构如图 7 所示。

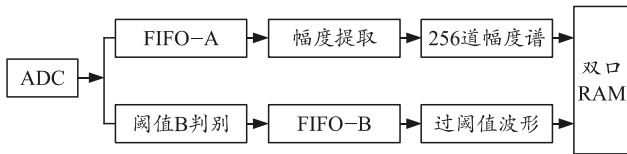


图 7 数据采集模块结构原理

ADC 采样数据的处理有 2 种模式：

系统处于能量刻度模式时，ADC 采样信号送至 FIFO-A(乒乓存储结构)，写满后提取脉冲最大值，并将脉冲幅度值按 256 道能谱的方式存储<sup>[6]</sup>。微处理器模块读取能谱数据，并发送至终端，用于探测系统的能量刻度。

系统接收到瞬发高能辐射观测指令时，将 ADC 输出数据先进行瞬发高能信号的阈值判别，当超过阈值时，使能 FIFO-B(乒乓存储结构)，将后续数据连续写入，时间数据约为 1.6 ms。写满后通过双口 RAM 上传至微处理器，对该段时间的波形数据

进行瞬发高能辐射事件的筛选。若甄别为瞬发高能辐射事件，则将数据传输至终端，反之舍弃。

##### 2) 微处理器模块。

微处理器的 Cortex-A4 内核运行 FreeRTOS 操作系统，用于与 FPGA 进行通信，获取 ADC 采集数据并进行实时处理，同时，Cortex-A4 内核还操作片内的 CAN 总线和 UART 总线外设，与终端进行通信。片内的 Cortex-A7 内核运行 Linux 操作系统，可使用标准的 socket 编程方式，实现与终端之间的网络通信。

辐射探测系统通过网络接收终端发送工作参数设置和数据传输指令。当收到开始测量指令时，开启模拟电路、探测器高压和高速 ADC 的电源，使能数据采集模块，开启瞬发高能辐射探测进程；当收到参数设置指令时，暂停辐射探测进程，开启参数设置进程，配置结束后，再重启瞬发高能辐射探测进程，同时向终端反馈“设置成功”指令；当收到数据上传指令时，选择指定的一路数据读出，然后上传至终端<sup>[7]</sup>。微处理器软件控制流程如图 8 所示。

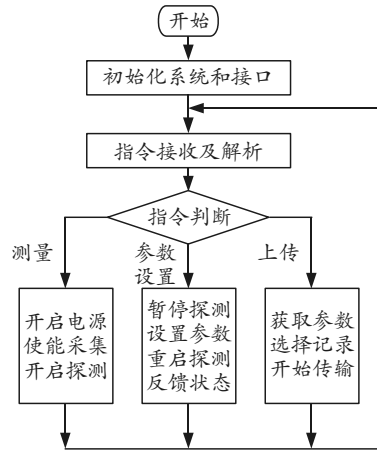


图 8 微处理器软件控制流程

#### 5 结束语

该数据采集系统已在某气球大气伽玛暴的浮空平台中使用，具有采集准确、抗干扰能力强、响应快速和体积紧凑等优点，得到了客户的一致好评。

#### 参考文献：

[1] WANG J, LI H L, XIN L P et al. Photometric and Spectroscopic Studies of Superoutbursts of Three Dwarf Novae Independently Identified by the SVOM/GWAC System in 2018[J]. The Astronomical Journal, 2020, 159(2): 20-25  
 [2] 范一中. 伽马射线暴的高能光子辐射[J]. 10000 个科学难题天文学卷, 2011, 1(1): 718-721.

- [3] 张娇婷, 张颖龙, 朱怡, 等. 基于 ARM+FPGA 的通用导弹弹载记录仪的设计[J]. 火箭与制导学报, 2014, 34(2): 38-41.
- [4] 王经瑾, 范天民. 核电子学: 上册[M]. 北京: 原子能出版社, 1985: 107-108.
- [5] 石勇, 陈宝. 基于 FPGA 的自适应信号采集系统[J]. 兵

\*\*\*\*\*  
(上接第 37 页)

## 4 结论

通过采用 VGG19 作为 SSD 基础网络、特征区域放大提取以及引入转置卷积的方法, 对传统 SSD 算法进行改进, 提升了小目标检测能力。在 PASCAL VOC 数据集上对比 Faster R-CNN、YOLO 和原 SSD 算法, 并且针对小目标检测能力做了专项对比实验。经过试验验证: 改进后的 SSD 目标检测算法在检测精度上有所提升, 对比试验证明, 改进后的算法对小目标检测能力有明显提升; 不足之处在于检测速度较原 SSD 有略微下降, 对于部分小目标的检测以及定位不准确, 这可能是因为将上下 2 层特征信息进行拼接时, 部分信息并非有效信息, 在此过程中因为噪声增大导致的。未来的工作可以考虑改进基础网络, 在保证精度的基础上提升检测速度。

笔者研究的目标检测算法能大大提升小目标的检测能力, 可应用在军事、航空工业领域, 也可通过在红外图像数据集上训练模型算法, 检测和识别红外目标, 从而装备应用到红外导引头, 甚至改进现有武器系统的导引方法, 提高制导精度, 在军事领域、航空目标识别等方面有广泛的应用研究价值。

## 参考文献:

- [1] 施泽浩, 赵启军. 基于全卷积网络的目标检测算法[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(5): 55-58.
- [2] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[M]. Leible B, Matas J, Sebe N, et al. Computer Vision-ECCV 2016. Cham: Springer, 2016: 21-37.
- [3] UIJLINGS J R R, SANDE K E A V D, GEVERS T, et al. Selective search for object recognition[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 104(2): 154-171.
- [4] REN S, HE KV, GIRSHICK RV, et al. Faster R-CNN:

工自动化, 2020, 39(4): 16-18.

- [6] 张小禄, 李海蓉, 丁毅, 等. 基于 CPLD 和 AD9240 的数据采集系统[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(S1): 172-175.
- [7] 刘宇, 顾振杰, 韩红斌. 基于实测数据的海杂波建模方法[J]. 兵工自动化, 2020, 38(9): 64-67.
- towards real-time object detection with region proposal networks[J] IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [5] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//Proceedings of CVPR 2015. Las Vegas, USA. New York: IEEE, 2015: 779-788.
- [6] 吴志洋, 卓勇, 廖生辉. 改进的多目标回归实时人脸检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(11): 1-7.
- [7] 马静. 基于视频序列的人脸检测与跟踪[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017: 8-14.
- [8] 唐杰. 基于视觉的车辆候选区域提取与车辆检测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015: 26-32.
- [9] 姚红革, 白小军, 杨浩琪. 基于 SSD 的多特征刑侦场景识别[J]. 西安邮电大学学报, 2018, 23(4): 28-33.
- [10] 翁晰. 目标检测网络 SSD 的区域候选框的设置问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 9-18.
- [11] 赵文清, 严海, 邵绪强. 改进的非极大值抑制算法的目标检测[J]. 中国图象图形学, 2018, 23(11): 1676-1685.
- [12] ZEILER M D, FERGUS R. Visualizing and understanding convolutional networks[C]//LNCS 8689: Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Zurich, Sep 6-12, 2014. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 818-833.
- [13] 姚群力, 胡显, 雷宏. 深度卷积神经网络在目标检测中的研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(17): 1-9.
- [14] 吴天舒, 张志佳, 刘云鹏, 等. 基于改进 SSD 的轻量化小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 37-43.
- [15] FU C Y, LIU W, RANGA A, et al. DSSD: deconvolutional single shot detector[EB/OL]. (2017-01-03) [2018-12-25]. <https://arxiv.org/abs/1701.06659>
- [16] XIE S, GIRSHICK R, DOLLAR P, et al. Aggregated residual transformations for deep neural networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016: 5987-5995.