

УДК 520.6

А. И. Архангельский<sup>1</sup>, Ю. Д. Котов<sup>1</sup>, П. Ю. Чистяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрофизики Московского инженерно-физического института (Державного університету), Росія

<sup>2</sup>ТОВ «СКІНЕР», Москва, Росія

**Цифровой процессор импульсных сигналов  
для спектрометрии заряженных частиц,  
нейтронов, рентгеновского и гамма-излучения**

---

Розроблено швидкий цифровий процесор імпульсних сигналів для спектрометрії заряджених частинок, нейтронів, рентгеновського і гамма-випромінювання в широкому діапазоні енергії реєстрованих частинок. Прилад призначено для спектрометрії сигналів тривалістю 250—10000 нс із сцинтиляційних і напівпровідникових детекторів в умовах космічного експерименту. Робота цифрового процесора ґрунтується на неперервному оцифруванні миттєвих значень вхідного сигналу з частотою 40 МГц 12-розрядним швидкодіючим АЦП, з наступною цифровою обробкою отриманої послідовності відліків спеціалізованим процесором в реальному часі та накопиченні спектральної інформації в банках пам'яті. Прилад вимірює амплітуду, площу імпульсів і необхідну часову інформацію (наприклад часову прив'язку до сигналів збігу/антизбігу від інших детекторів), здійснює ідентифікацію імпульсів, режекцію накладок і перегрузок засобом цифрової обробки оцифрованого профілю вхідного сигналу в реальному масштабі часу. Описуваний цифровий процесор імпульсних сигналів можна використати у будь-якій високопродуктивній вимірювальній системі, що має у складі інтерфейс з шиною ISA-8, по якій виконується керування приладом і знімання спектрометричної інформації.

---

Современная физика высоких энергий все чаще использует методы цифровой регистрации [2—5, 8] формы импульсов детекторов ионизирующих излучений для детального анализа формы сигналов, позволяющего получить наиболее полную информацию об изучаемых явлениях, недоступную аналоговым методам. Применение цифровой регистрации формы импульсов предоставляет наиболее точные и гибкие методы решения таких традиционных для физики высоких энергий задач, как спектрометрия потоков нейтральных и заряженных частиц, идентификация частиц по форме импульса, режекция наложений импульсов, а также «паразитных» сигналов имеющих характерные особенности формы импульса. До недавнего времени основным сдерживающим фактором для широкого внедрения подобных устройств являлись значительные трудности обеспечения их работы в режиме реального времени, обусловленные отсутствием быстродействующей элементной базы с низким энергопотреблением. Достигнутый в последнее десятилетие прогресс в области быстродействующей цифровой тех-

ники, появление на рынке недорогих АЦП и ПЛИС, работающих на частотах в десятки и сотни мегагерц, позволяет создавать недорогие, компактные устройства с низким энергопотреблением, основанные на чисто цифровых методах обработки сигнала. Данная работа посвящена созданию цифрового метода спектрометрии и идентификации частиц, пригодного как в лабораторных условиях, так и в условиях космического эксперимента.

В ходе работ в рамках российского космического проекта КОРОНАС-ФОТОН [1, 6] разработан цифровой процессор импульсных сигналов (ЦПИС) для спектрометрии заряженных частиц, нейтронного, рентгеновского и гамма-излучения в широком диапазоне энергии регистрируемых частиц. ЦПИС предназначен для спектрометрии сигналов длительностью 250—10000 нс с полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов (BGO, NaI, CsI, BaF<sub>2</sub>), выполнен в конструктиве MicroPC Octagon Systems и может быть использован в любой измерительной системе, имеющей в составе интерфейс с шиной ISA-8, по которой производится управление



устройством и съем спектрометрической информации.

Работа ЦПИС основана на непрерывной оцифровке мгновенных значений входного сигнала с частотой 40 МГц 12-разрядным быстродействующим АЦП Maxim MAX1421 с последующей цифровой обработкой полученной последовательности отсчетов специализированным процессором на основе ПЛИС EP1K100 семейства Altera ACEX 1K. Обработка проводится в реальном времени. Спектральная информация накапливается в ОЗУ устройства суммарной емкостью 64 килобайт/канал, организованном в виде набора (2 или 4) независимых банков памяти.

В состав ЦПИС входит два независимых спектрометрических канала. Каждый канал включает в себя (функциональная схема устройства приведена на рис. 1):

- инструментальный усилитель с изменяемым коэффициентом усиления;
- быстродействующий АЦП;
- специализированный процессор, осуществляющий дискриминацию и цифровое интегрирование входных импульсов, режекцию наложений и перегрузок, анализ формы импульса входного сигнала, формирование временных интервалов циклов набора спектров и заполнение банков памяти канала спектральной информацией. Процессор включает в себя, кроме того, узел управления, а также набор счетчиков, осуществляющих счет «живого» и полного времени набора, числа срабатываний дискриминаторов уровня сигнала, числа наложений и запрещающих сигналов управления;
- ОЗУ, в котором происходит накопление спектров (64 кБайт/канал);
- энергонезависимое ЗУ;
- интерфейс с шиной ISA-8;
- тактовый генератор частотой 40 МГц.

Управление работой ЦПИС осуществляется при помощи двух внешних логических сигналов отбора событий, а также путем записи 8 или 16-разрядных кодов в соответствующие регистры устройства, при этом возможна оперативная настройка порогов дискриминаторов, режекторов наложений и перегрузок, времени интегрирования входного сигнала, времени накопления спектров и ряда других параметров. Текущие значения всех настраиваемых параметров запоминаются в энергонезависимом ЗУ и автоматически заносятся в соответствующие управляющие регистры при включении питания цифрового процессора или при подаче соответствующей команды управления. Вывод спектральной информации из банков памяти, а также содержимого счетчиков устройства осуществляется по шине

#### Основные характеристики ЦПИС

| Параметр   | Значение   |
|--|--|
| Количество каналов   | 2 однополосных или 2 дифференциальных (устанавливается переключателями)  |
| Полярность однополосного сигнала                                 | положительная или отрицательная (устанавливается переключателями)  |
| Максимальная амплитуда входных сигналов                          | однополосный — $-10 \text{ В} / +10 \text{ В}$ , дифференциальный — $\pm 10 \text{ В}$ ,   |
| Рабочий диапазон входных сигналов                                | однополосный — $-5 \dots 0 \text{ В} / 0 \dots +5 \text{ В}$ дифференциальный — $\pm 5 \text{ В}$  |
| Входное сопротивление канала                                     | 10 кОм   |
| Коэффициент усиления инструментального усилителя каналов         | 0,5, 1, 2, 5, 10 (устанавливается переключателями)   |
| Разрядность измерительных АЦП модуля, бит                        | 12   |
| Интегральная нелинейность измерительных АЦП модуля, не более     | 0,5 младшего разряда   |
| Дифференциальная нелинейность измерительных АЦП модуля, не более | 0,5 младшего разряда   |
| Частота выборки входного сигнала                                 | 40 МГц   |
| Время обработки одного импульса, не более                        | 1 мкс  |
| Емкость одной ячейки спектра                                     | 8, 16, 24 или 32 бит (выбирается программно)   |
| Число ячеек в спектре  | 128, 256, 512, 1024, 2048 или 4096 (выбирается программно)   |
| Число внешних сигналов управления                                | 2 («ЗАПРЕТ» и «РАЗРЕШЕНИЕ», уровни сигналов — ТТЛ, фронт 0,05—1,5 мкс, длительность 300—10000 нс)  |
| Режекция наложений   | Программная (амплитудная режекция и анализ формы импульса входного сигнала)  |
| Режекция перегрузок  | Программная  |
| Размер ОЗУ модуля  | 128 кБайт (делится поровну между каналами)   |
| Размер «быстрого» буферного ОЗУ модуля                           | 6 кБайт (делится поровну между каналами)   |
| Число программно управляемых таймеров в каждом канале            | 2  |
| Число выходных логических сигналов в каждом канале               | 4  |
| Число внутренних, программно доступных счетчиков в каждом канале | 32-разрядных: 4 (счетчики «живого» времени)<br>24-разрядных: 12 (счетчики числа срабатываний ДНУ0, сигналов «ЗАПРЕТ» и срабатываний режектора наложений)<br>16-разрядных: 4 (счетчики полного времени) |
| Интерфейс модуля   | Шина ISA-8 MicroPC   |
| Число используемых аппаратных прерываний                         | 1  |
| Число каналов ПДП  | 1  |
| Рабочий диапазон температур                                      | 0...+40 °С   |
| Габаритные размеры   | 124,5 мм × 114,3 мм  |
| Потребляемая мощность, не более                                  | 1,2 Вт   |

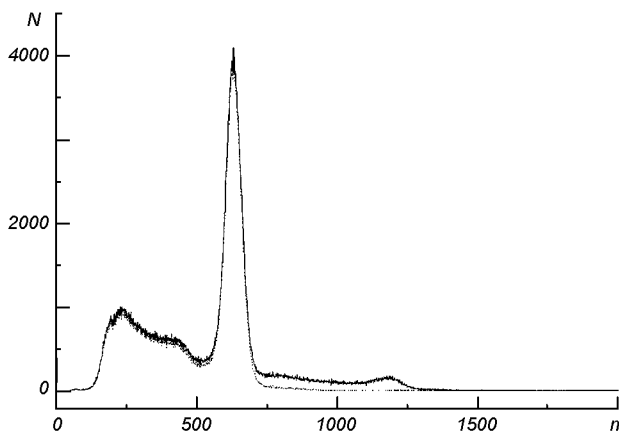


Рис. 2. Спектр источника  $^{137}\text{Cs}$ , измеренный детектором на основе кристалла  $\text{CsI(Tl)}$  размером  $36 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$  посредством ЦПИС. Постоянная интегрирования сигнала — 10 мкс. Время набора спектра 49.3 с, «живое» время 35.6 с.

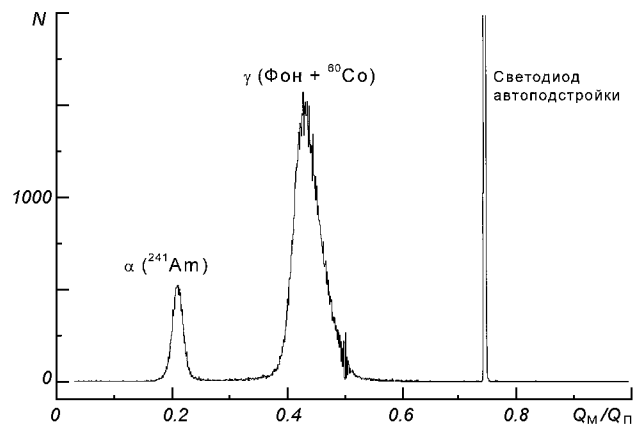
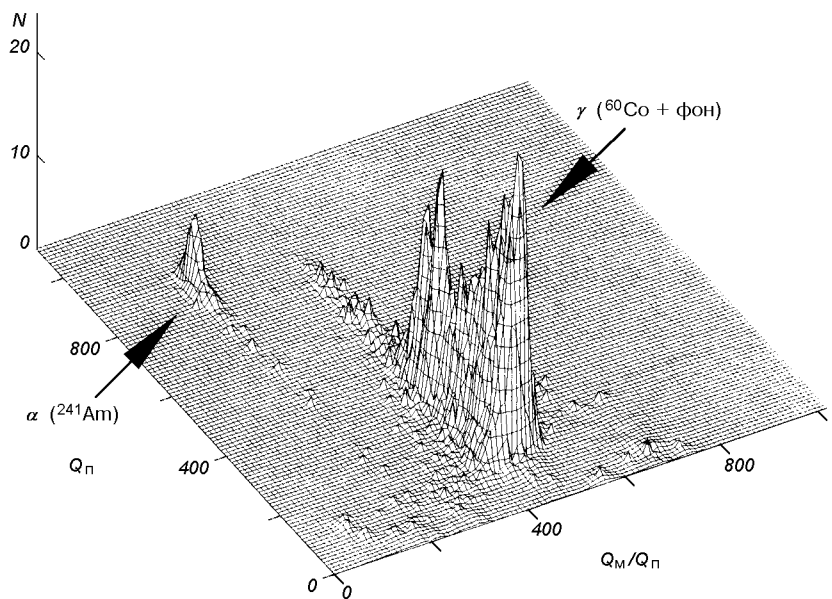


Рис. 3. Распределение импульсов на выходе детектора на основе 8 кристаллов  $\text{CsI(Tl)}$  размером  $36 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$  по отношению медленной компоненты заряда к полному заряду для  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и  $\alpha$ -частиц  $^{241}\text{Am}$  при выключенном режиме перегрузок ЦПИС. Постоянная интегрирования полного заряда — 10 мкс, медленной компоненты заряда — 8 мкс

Рис. 4. Трехмерная диаграмма «отношение медленной компоненты заряда к полному заряду ( $Q_{\text{медл}}/Q_{\text{полн}}$ ) — полный заряд ( $Q_{\text{полн}}$ )» при облучении детектора на основе  $\text{CsI(Tl)}$   $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  и  $\alpha$ -частицами  $^{241}\text{Am}$ , измеренная посредством ЦПИС



ISA-8 с использованием прямого доступа к памяти, при этом набор информации продолжается без потерь. Основные характеристики устройства приведены в таблице.

На рис. 2 приведен пример спектра источника  $^{137}\text{Cs}$ , измеренного при выключенном (сплошная линия) и включенном (пунктир) режиме наложений ЦПИС посредством системы, состоящей из управляющего контроллера, ЦПИС и детектора на основе кристалла  $\text{CsI(Tl)}$  размером  $36 \text{ см} \times 8 \text{ см} \times 4.5 \text{ см}$ , просматриваемого двумя ФЭУ-110 с противоположных сторон кристалла. Энергетическое разрешение системы составило 8 %

на линии 662 кэВ. Степень подавления наложений порядка 5 при входной загрузке системы 19.1 кГц.

На рис. 3 приведен пример использования ЦПИС в режиме отбора событий по форме сцинтилляционной вспышки в  $\text{CsI(Tl)}$ . Измерения проводились посредством системы, состоящей из управляющего контроллера, ЦПИС и детектора на основе восьми кристаллов  $\text{CsI(Tl)}$  размером  $36 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$ , каждый из которых просматривался двумя ФЭУ-110 с противоположных сторон кристалла. В основе метода лежит наличие в световой вспышке, возникающей в кристалле  $\text{CsI(Tl)}$ , двух компонентов с разными постоянными высвечивания, причем отно-

шение интенсивности медленного компонента  $Q_{\text{медл}}$  к полному заряду  $Q_{\text{полн}}$  (или к быстрому компоненту высвечивания  $Q_{\text{быстр}}$ ) зависит от удельной ионизации регистрируемых частиц [7]. Для отбора событий применялся метод цифрового интегрирования заряда на выходе детектора в течение двух различных временных интервалов. Полученные интегралы использовались в качестве оценок величин  $Q_{\text{медл}}$  и  $Q_{\text{полн}}$ . На рис. 3 видно четкое разделение трех пиков от  $\alpha$ -частиц  $^{241}\text{Am}$ ,  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и сигнала светодиода системы автоподстройки, находящегося в оптическом контакте с кристаллом CsI(Tl). Степень разделения  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, оцененная по критерию

$$M = (A_\alpha - A_\gamma) / 0.5 \cdot (W_\alpha + W_\gamma),$$

где  $A_i$  и  $W_i$  — высота и FWHM пиков соответственно, составила  $M = 3.26$ .

На рис. 4 приведена трехмерная диаграмма ( $Q_{\text{медл}}/Q_{\text{полн}} - Q_{\text{полн}}$ ) для тех же условий измерений. На диаграмме отчетливо видны области соответствующие  $\alpha$ -частицам  $^{241}\text{Am}$  и  $\gamma$ -квантам  $^{60}\text{Co}$  (сигнал от светодиода системы автоподстройки исключен посредством режектора перегрузок ЦПИС с соответствующей установкой порога срабатывания), что свидетельствует о способности системы осуществлять надежную идентификацию частиц.

Разработанная методика и выполненное на ее основе устройство предоставляют возможность создавать компактные высокопроизводительные измерительные системы реального времени с низким энергопотреблением. Использование ПЛИС в качестве основного элемента осуществляющего обработку измеряемых сигналов позволяет производить гибкую перенастройку системы под условия конкретной задачи путем перепрограммированием ПЛИС без изменения конструкции устройства.

1. Котов Ю. Д. Научные задачи российского спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН» // Третья Украинская кон-

ференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Кацивели, Крым, 2003.—С. 34.

2. Мелешко Е. А. Быстродействующие цифровые регистраторы формы сигнала // Приборы и техн. эксперимента.—1997.—№ 1.—С. 5—26.
3. Хрячков В. А., Дунаев М. В., Кетлеров В. В. и др. Новый метод разделения заряженных частиц с использованием кристаллов CsI(Tl) // Приборы и техн. эксперимента.—2000.—№ 3.—С. 29—37.
4. Drndarevic V., Ryge P., Gozani T. Digital signal processing for high rate gamma-ray spectroscopy // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.—1989.—A277.—P. 532—536.
5. Hilsenrath F., Voss H. D., Bakke J. C. A single chip pulse processor for nuclear spectroscopy // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1985.—NS-32, N 1.—P. 145—149.
6. Kotov Yu. D. The scientific tasks and instruments of the PHOTON space project project for the study of solar flares // J. Moscow phys. Soc.—1996.—6, N 4.—P. 311—315.
7. Storey R. S., Jack W., Ward A. The Fluorescent Decay of CsI(Tl) for Particles of different ionisation density // Proc. Phys. Soc.—1958.—72, N 1.—P. 1—6.
8. Yue Q., Lai W. P., Chang W. C., et. al. Effective dynamic range in measurements with flash analog-to-digital convertor // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.—2003.—A511.—P.408—416.

#### DIGITAL PULSE PROCESSOR FOR SPECTROMETRY OF CHARGED PARTICLES, NEUTRONS, X-RAY, AND GAMMA-RAY

A. I. Arkhangelsky, Yu. D. Kotov, P. Yu. Chistjakov

A high performance digital pulse processor is developed for spaceflight applications. A fully digital method for acquisition of spectra of charged particles, neutrons, and gamma-ray in a wide energy range was developed and tested. A fast 40 MHz digitizer is used to digitize pulses from scintillation and semiconductor detectors with decay times in a range of 250 to 10000 ns to 12-bit resolution on 25 ns intervals. Digital filtering, pulse searching and pulse shape discrimination algorithms are used to identify pulses, detect for pileup and pulse saturation. The pulse processor measures pulse height, pulse area, and the required timing information (e. g. multi detector coincidence). A pulse shape distribution is generated, corresponding to a conventional multichannel analyzer spectrum. Thanks to parallel digital architecture of the device, the interface is ISA-8 bus compatible. The fast real time pulse-processing algorithm will allow wide use of the technique described in high performance spectroscopy.