

Программа управления многоканальным детектором для малогабаритного спектрометра

И. Ю. Омелюсик, Е. С. Воропай, А. Е. Радько

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: ivanom0505@gmail.com

В работе представлена разработка программно-аппаратного комплекса управления многоканальным фотодетектором для малогабаритного спектрометра. На базе микроконтроллера STM32F103C8T6 реализованы формирование управляющих сигналов, оцифровка и передача данных ПЗС-линейки. Разработано программное обеспечение для визуализации и калибровки спектра, подтверждающее эффективность применения микроконтроллерных систем в компактной спектроскопии.

Ключевые слова: спектрометр; спектральный анализ; ПЗС-линейка; многоканальный детектор; микроконтроллер STM32; аналого-цифровое преобразование; визуализация спектра; калибровка; цифровая обработка сигнала.

Multichannel detector control program for a small-sized spectrometer

I. Y. Amialiusik, E. S. Voropay, A. E. Radko

Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: ivanom0505@gmail.com

The paper presents the development of a hardware–software system for controlling a multichannel photodetector used in a compact spectrometer. Based on the STM32F103C8T6 microcontroller, the system performs control signal generation, data digitization, and transmission from the CCD linear array. Software for spectral visualization and calibration has been developed, demonstrating the effectiveness of microcontroller-based systems in compact spectroscopy applications.

Keywords: spectrometer; spectral analysis; CCD linear array; multichannel detector; STM32 microcontroller; analog-to-digital conversion; spectrum visualization; calibration; digital signal processing.

Введение

Современные спектрометрические системы находят широкое применение в химическом анализе, медицине, экологии и материаловедении, где требуется быстрое и точное определение спектрального состава излучения. Одним из ключевых направлений развития является создание компактных и недорогих приборов на основе микроконтроллеров и многоканальных детекторов.

В представленной работе рассматривается реализация малогабаритного спектрометра, использующего ПЗС-линейку TCD1304 в качестве регистрирующего элемента. Управление детектором и обработка данных осуществляются с

помощью микроконтроллера STM32F103C8T6, обеспечивающего генерацию синхронизирующих сигналов, оцифровку аналогового сигнала и передачу данных на персональный компьютер.

Разработанный комплекс позволяет регистрировать распределение интенсивности излучения по длине волны и визуализировать полученные спектры. Работа направлена на демонстрацию возможности создания функционального спектрометра с применением доступной элементной базы при сохранении высокой точности и стабильности измерений.

1. Постановка задачи и принципы функционирования системы

Современные методы спектрального анализа требуют регистрации распределения интенсивности электромагнитного излучения с высокой точностью и временным разрешением. Разработка компактных и энергоэффективных спектрометров на основе микроконтроллеров представляет значительный интерес благодаря низкой стоимости, простоте эксплуатации и возможности интеграции в переносные аналитические устройства.

Целью данной работы является создание программно-аппаратного комплекса для управления многоканальным фотодетектором – ПЗС-линейкой TCD1304 – и последующей цифровой обработки данных. Основной задачей является синхронное формирование управляющих сигналов, оцифровка аналогового выхода и передача данных на персональный компьютер для визуализации спектра.

ПЗС-линейка TCD1304 представляет собой линейный массив из 3648 фоточувствительных элементов размером 8×200 мкм, функционирующих по принципу интеграции заряда. При освещении каждого пикселя поток фотонов преобразуется в электрический заряд, пропорциональный интенсивности света.

Считывание информации осуществляется под действием трёх синхронизированных сигналов: ICG (Integration Clear Gate), определяющего момент сброса накопленного заряда; SH (Sample and Hold), задающего начало накопления; и CLK (Clock), обеспечивающего последовательное сдвигание зарядов вдоль линейки. Корректная работа устройства требует точной временной синхронизации этих сигналов, что достигается средствами аппаратных таймеров микроконтроллера.

2. Реализация микроконтроллерного модуля

Для управления детектором используется микроконтроллер STM32F103C8T6, построенный на архитектуре ARM Cortex-M3. Его функциональные возможности, включая 12-разрядный АЦП, несколько высокоточных таймеров и встроенный интерфейс USB CDC, позволяют реализовать полный цикл сбора и передачи спектральных данных без внешних компонентов.

Генерация управляющих сигналов выполняется следующим образом. Формирование управляющих сигналов для работы ПЗС-линейки осуществляется средствами аппаратных таймеров микроконтроллера. Тактовый сигнал CLK, обеспечивающий последовательное считывание зарядов, генерируется в режиме

широотно-импульсной модуляции с частотой около 1–2 МГц. Импульсы SH и ICG, задающие моменты начала интеграции и сброса накопленного заряда, создаются вторым таймером с точно выдержанными временными интервалами, определяющими длительность экспозиции. Аналого-цифровое преобразование производится модулем ADC1, запуск которого синхронизирован с фронтами тактового сигнала, что обеспечивает съём данных в момент стабилизации напряжения на выходе линейки и повышает точность регистрации.

Сигнал с выхода линейки TCD1304 представляет собой низкоамплитудное аналоговое напряжение, требующее усиления. Для этой цели используется малошумящий операционный усилитель, согласованный по входной ёмкости с выходным каскадом детектора. Усиленный сигнал поступает на вход АЦП, где преобразуется в цифровую форму. Результаты оцифровки сохраняются в буфере памяти с использованием DMA (Direct Memory Access), что позволяет минимизировать нагрузку на процессорное ядро и повысить стабильность передачи данных.

Передача спектральной информации на персональный компьютер осуществляется через интерфейс USB в режиме CDC (виртуальный COM-порт). Данный способ обеспечивает совместимость с любыми операционными системами без необходимости установки драйверов и гарантирует устойчивую передачу потоковых данных в реальном времени.

3. Программная обработка и визуализация данных

Программное обеспечение, разработанное для персонального компьютера, выполняет приём, обработку и визуализацию спектральных данных. Для реализации использован язык Python и библиотеки pySerial, NumPy и Matplotlib, что обеспечивает кроссплатформенность и гибкость модификации.

Программа инициирует обмен с микроконтроллером по USB-интерфейсу, принимает массивы данных и интерпретирует их как значения интенсивности света, зарегистрированные отдельными пикселями линейки. Для приведения данных к физической шкале длин волн используется калибровочная функция, устанавливающая соответствие между номером пикселя и длиной волны. Калибровка проводится с помощью эталонных источников излучения и аппроксимируется линейной или полиномиальной зависимостью.

Полученные данные могут быть дополнительно обработаны цифровыми методами – сглаживанием, фильтрацией или нормализацией – с целью уменьшения шумов и повышения наглядности спектра. Графическое отображение результатов реализовано в интерактивном виде: спектр обновляется в реальном времени и может быть зафиксирован пользователем для дальнейшего анализа.

Таким образом, реализованный программный модуль обеспечивает замкнутый цикл – от регистрации сигнала фотодетектором до получения визуализированного спектра, готового к интерпретации или количественной обработке.

Заключение

Разработанная система сочетает простоту аппаратной реализации с достаточной точностью измерений. Использование микроконтроллера STM32F103C8T6 позволяет синхронно управлять всеми временными параметрами, выполнять аналого-цифровое преобразование и обмен данными, что делает устройство полностью автономным.

Применение аппаратных таймеров и DMA-передачи данных исключает влияние программных задержек и джиттера, обеспечивая стабильность временных интервалов. Благодаря этому достигается высокая точность считывания сигнала и возможность масштабирования системы под другие ПЗС-линейки или фотодиодные матрицы.

Предложенная архитектура может быть расширена за счёт внедрения 16-разрядного АЦП, добавления цифровой фильтрации на уровне микроконтроллера и реализации режима автокалибровки. Это позволит повысить динамический диапазон, уменьшить шумовую составляющую и использовать систему для спектрометрических измерений в реальных лабораторных условиях.

Библиографические ссылки

1. *Skoog, D. A. Principles of instrumental analysis / D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch. – 7th ed. – Boston : Cengage Learning, 2018. 1056 p.*
2. *Райхбаум Я. Д. Физические основы спектрального анализа – М.: «Наука». 1980.*
3. *Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 860 p.*
4. STM32 step-by-step: Getting started with STM32. [Electronic resource]. URL: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:Getting_started_with (дата доступа: 25.04.2025).
5. STM32: STM32_step_by_step/Noviello, C. Mastering STM32 [Electronic resource] / C. Noviello. Leanpub, 2017. URL: <https://leanpub.com/mastering-stm32> (дата доступа: 25.04.2025).
6. *Тарасов К. И. Спектральные приборы. – Л.: «Машиностроение». 1977.*
7. Спектральные приборы для аналитических применений Перспективные разработки / Под редакцией Е. С. Воропая Мн.: БГУ, 2005. 196 с.
8. *Зайдель А. Н. Техника и практика спектроскопии / А. Н. Зайдель., Г. В. Островская, Ю. И. Островский – М.: «Наука», 1976 г.*