

# Интерфейсный блок и протокол обмена данными для измерительной кремниевой системы

А. Воронин, к. ф.-м. н.<sup>1</sup>

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Считывающая электроника (СЭ) для кремниевых детекторов оснащается интерфейсом, связывающим СЭ (или специализированные интегральные микросхемы – СИМС) и систему сбора данных (DAQ). Это может быть простой аналоговый интерфейс (как, например, в СИМС VA-1), аналого-цифровой (СИМС APV25) или цифровой интерфейс (СИМС FSSR2). Кроме передачи данных из СЭ, интерфейс должен обеспечивать поступление в СЭ команд управления, а также осуществлять обмен служебной информацией. При этом определяются данные о состоянии СЭ (мониторинг), правильности приема и передачи команд, синхронизации и другие параметры. В статье рассмотрены особенности реализации интерфейсного блока и протокола обмена данными для считывающей электроники кремниевых детекторов в проектах физики высоких энергий (ФВЭ) и физики космических лучей (ФКЛ).

В экспериментах ФВЭ возможно применение как стандартных интерфейсов (I<sup>2</sup>C), так и интерфейсов, разработанных под конкретный эксперимент (СИМС FSSR2, SVX4), в том числе на основе оптоволоконных линий. В космических экспериментах ФКЛ интерфейсные блоки и протоколы обмена данными должны быть совместимыми с бортовыми системами DAQ, командными и телеметрическими системами космического аппарата.

Особенностью интерфейсов СЭ для измерительной кремниевой системы можно считать их многоканальность, компактность и, во многих случаях, наличие промежуточной согласующей электроники между СЭ и линиями DAQ. В модернизированной аппаратуре экспериментов на БАК (ЦЕРН) и в других новых экспериментах (СВМ) между СЭ и DAQ

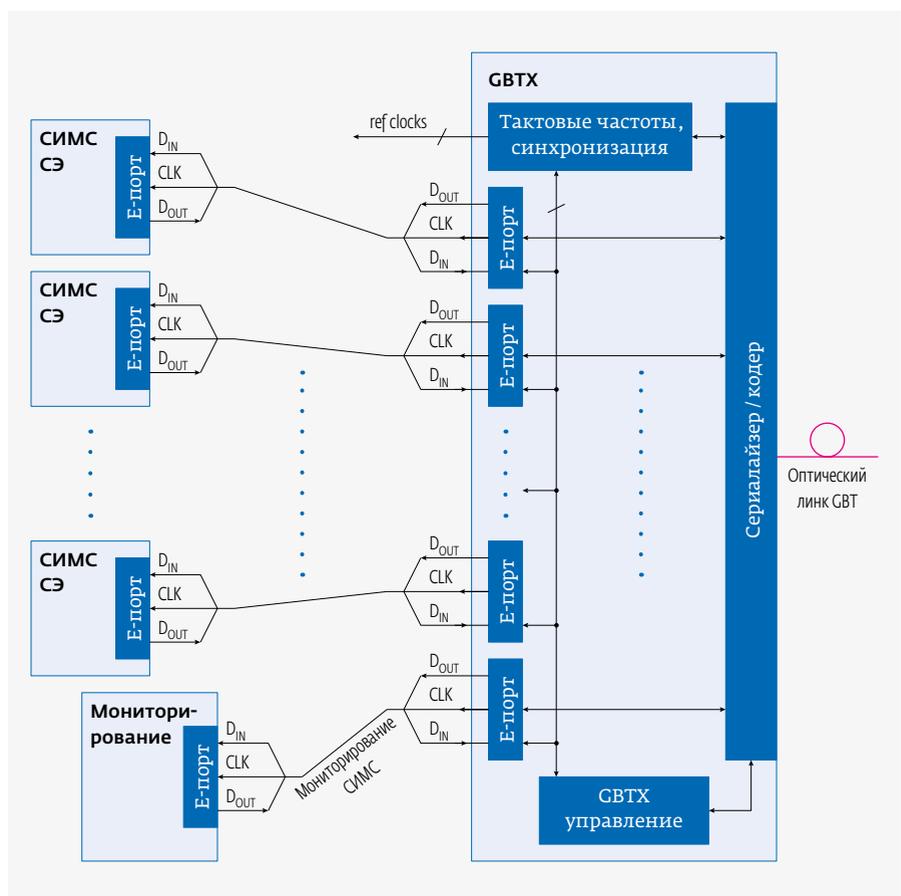


Рис. 1. Структурная схема подключения СИМС GBTX к СИМС СЭ

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцина МГУ им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник, voronin@silab.sinp.msu.ru.

применяется разработанная в ЦЕРН система GBT (GigaBit Transceiver), согласующая кабельный электрический интерфейс «Е-линк» (e-link) с оптическим каналом системы GBT [1]. Согласование обеспечивает СИМС GBTx, также разработанная в ЦЕРН (рис. 1). Е-линк СИМС GBTx осуществляет обмен информацией максимально для 40 СИМС СЭ (в зависимости от количества выходов СИМС СЭ) и одной микросхемы GBTx. Для обмена данными модули или СИМС СЭ должны содержать интерфейсный блок «Е-порт» (e-port). Для связи DAQ и GBTx используется оптическая линия на 3,2–4,48 Гбит/с. Кабельная часть линии связи со стороны СЭ и GBTx соответствует стандарту SLVS (Scalable Low Voltage Standard) [2]. Линия передачи для эксперимента СВМ – однонаправленная, дифференциальная, скрученная пара длиной до нескольких метров с разделительными конденсаторами (связь по переменному току), длина зависит от скорости передачи, которая может быть 320, 160, 80 Мбит/с. Нагрузка линии – 100 Ом.

В составе Е-линка имеется три типа шин со стороны СЭ (см. рис. 1):

- Data-up (Dout) – передача данных (команд) из СИМС СЭ или модуля СЭ в GBTx;
- Data-down (Din) – прием данных (команд) в СИМС из GBTx;
- Clock (CLK) – шина тактовой частоты.

Тактовая частота может принимать значения 40, 80, 160 или 320 МГц. Оптимальные фазовые соотношения между передним фронтом тактовых сигналов и сигналами данных показаны на рис. 2. Информация передается в пакетном режиме. Информационный пакет состоит их байтов с кодированием 8/10 бит. При такой структуре передачи

информации должны осуществляться три типа синхронизации: побитовая, побайтовая и пакетная (см. рис. 2) [1].

Е-линк является достаточно гибким интерфейсом [1]. Протокол обмена практически создается пользователем, и для разных подсистем он может быть неодинаков. Аппаратная часть в СИМС также может быть рассчитана на разные скорости передачи данных/команд, тактовую частоту и количество линий Data-up, Data-down, Clock.

Например, в проекте СВМ был предложен вариант информационного обмена с модулями СЭ, каждый из которых содержит восемь СИМС STS-XYTER [3]. В этом решении применяется одна линия Clock (160 МГц), одна линия управления Data-down (160 Мбит/с) и 40 линий данных Data-up (320 Мбит/с).

Процесс обмена данными в Е-линке начинается с его инициализации, то есть ввода в синхронизм приемных и передающих частей Е-линка с контролем синхронизации – проверкой правильности приема-передачи, в частности при помощи кодовой комбинации K28.1. Эта комбинация передается для контроля в СИМС GBTx. Когда синхронизация установлена, периодически в пакет данных добавляется известный код K28.1 или K28.5 для упрощенной проверки синхронизации и контроля правильности передачи данных. В системе «Е-линк – GBTx» возможно применение различных кодов, позволяющих корректировать ошибки приема-передачи информации, например использование известных кодов Хэмминга. Использование самокорректирующих кодов обеспечивает также уменьшение ошибок при передаче данных из-за эффекта SEU (single event upset). Е-порт в СИМС СЭ обеспечивает аппаратные функции, необходимые для обеспечения надежной работы Е-линка (рис. 3).

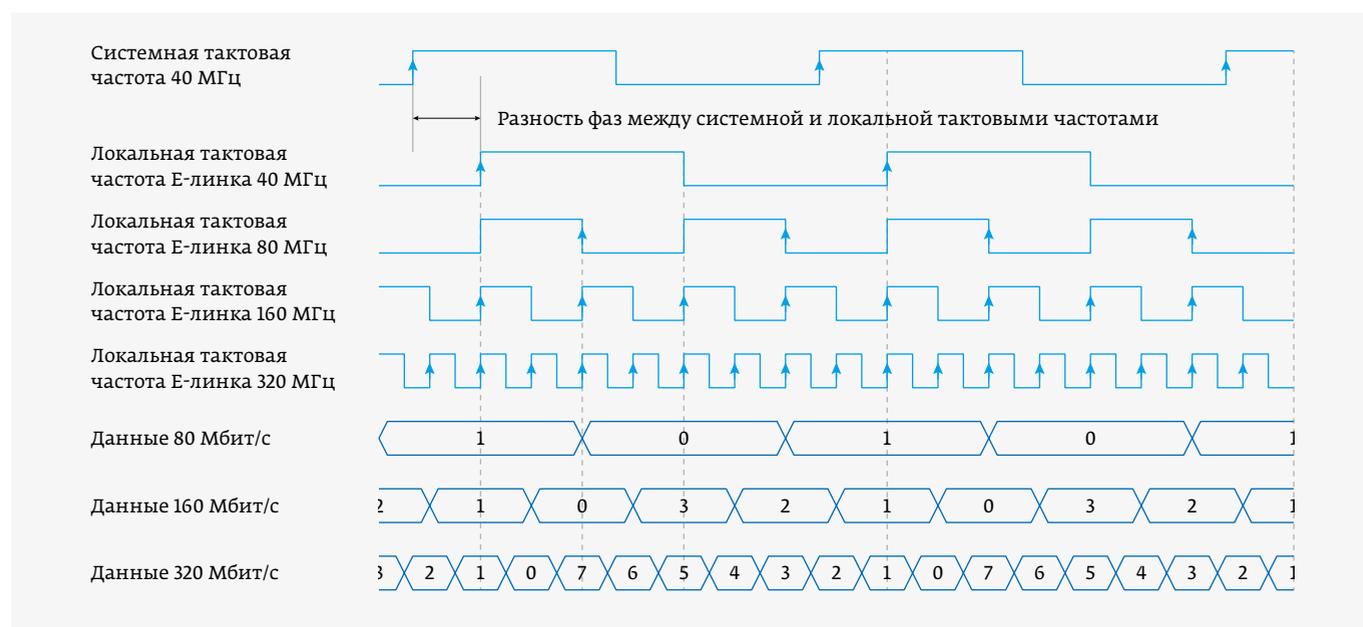


Рис. 2. Фазовые соотношения между тактовыми импульсами (ТИ) и данными (CLOCK и DATA)

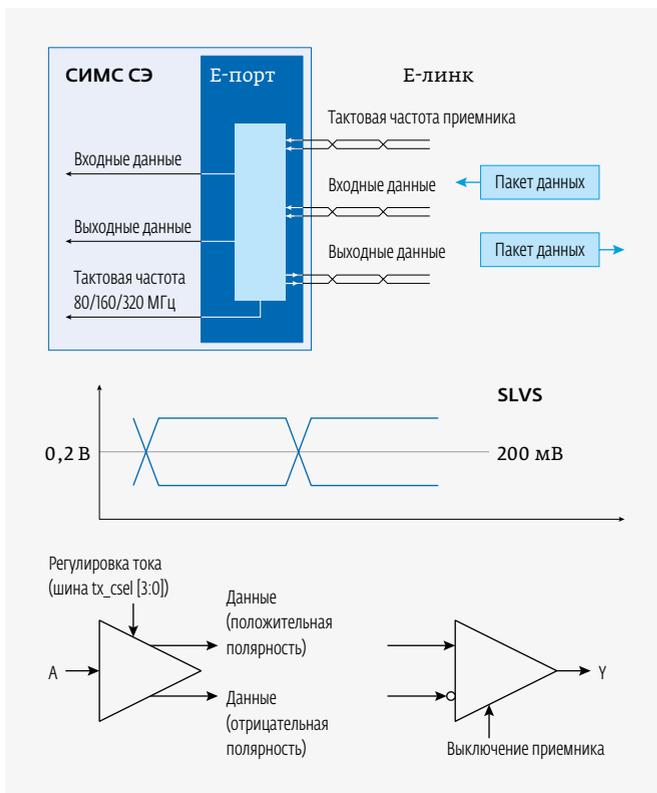


Рис. 3. Структура Е-порта, стандартные сигналы SLVS, схемы передатчика и приемника Е-порта

Базовая линия дифференциального сигнала на выходе передатчика составляет 0,2 В. Смещение базовой линии по отношению к стандартному значению приводит к изменению фаз дифференциальных составляющих сигнала. Возможно соединение приемника и витой пары по постоянному или переменному току. Более надежный способ – соединение по переменному току.

Дифференциальный приемник (см. рис. 3) оснащен функцией выключения и обеспечивает согласование по его выходу логических уровней модуля или СИМС СЭ. Дифференциальный передатчик содержит управляемый источник тока по шине tx\_csel [3:0] с функцией выключения. Стандартный ток 2 мА обеспечивает перепад 400 мВ на нагрузке 100 Ом. Уменьшение тока до 1,3/0,8/0,5 мА снижает потребляемую мощность (с уменьшением скорости передачи) и перепад напряжения на нагрузке, пропорциональный величине тока.

В экспериментальной СИМС СЭ MUCH V4, спроектированной для проекта СВМ [4], используются интерфейсы Е-линк (320/160 МГц) и I<sup>2</sup>C для приема-передачи информации с СИМС GBTx или ее аналогов (проекты MPD, VM&N (НИКА, ОИЯИ)). Отметим, что поставки GBTx в Россию запрещены.

Рассмотрим подробнее структуру СИМС MUCH V4, обеспечивающую генерацию выходных данных,

содержащих значения амплитуд в каналах на выходе цифрового пикового детектора (ПД) и временную метку события. Коды имеют структуру 8/10 бит для повышения помехоустойчивости. СИМС содержит Е-порт с системой синхронизации и преобразования входных и выходных кодов, драйверы приема-передачи информации и блок формирования тактовых частот (рис. 4). Прототипирование СИМС реализовано на основе технологии 180 нм компании UMC (Тайвань). СИМС содержит 32 измерительных канала (потребление 10 мВ на канал) с самотриггированием в каждом канале (метод data driven) [4].

СИМС MUCH V4 выполняет следующие основные функции: прием данных и команд для инициализации СИМС, прием сигналов детекторов и их обработку, конвертацию данных в последовательный код и передачу их по Е-линку с максимальной скоростью до 320 МГц. Сигналы, приходящие на вход каналов, асинхронны и имеют случайный характер.

Коды амплитуд, полученные с помощью цифрового помехоустойчивого пикового детектора (ПД) и блока метки времени в коде Грея [4], поступают в интерфейсную часть СИМС через мультиплексоры и промежуточную память, которые необходимы для конвертации информации в коды 8/10 бит. Интерфейсная часть работает в соответствии с разработанным протоколом СВМ\_MUCH protocol, аналогичным протоколу, описанному в [3], с некоторыми изменениями. Минимальный период прихода событий на вход каждого канала СИМС MUCH V4 составляет порядка 100 нс.

Интерфейсная часть СИМС СЭ MUCH V4 обеспечивает передачу амплитуды цифрового пикового детектора каналов, на выходе которых присутствует сигнал; адреса каналов с сигналами; кода метки времени. Сервисная информация о проблемах при передаче данных и синхронизации MUCH V4 с GBTx производится в соответствии с протоколом СВМ\_MUCH protocol. Ниже приведены некоторые данные о работе протокола.

В начале работы обеспечивается синхронизация. Некоторые сообщения при синхронизации не имеют кодирования 8/10 бит: сообщение SOS – начало синхронизации, сообщение EOS – конец синхронизации [3]. Остальная информация кодируется в формате 8/10 бит.

В начале синхронизации используется последовательность K28.1 [3] и определяются пакетная задержка и ее регулировка. Блоки синхронизации, кодирования / декодирования, управления и преобразования кодов обеспечивают устойчивую работу интерфейса (см. рис. 2, 4). Для повышения надежности применяется проверка контрольных сумм пакетов данных CRC.

Обмен информацией осуществляется по линиям связи downlink (Data-down) и uplink (Data-up). Рассмотрим структуру пакета данных downlink (рис. 5).

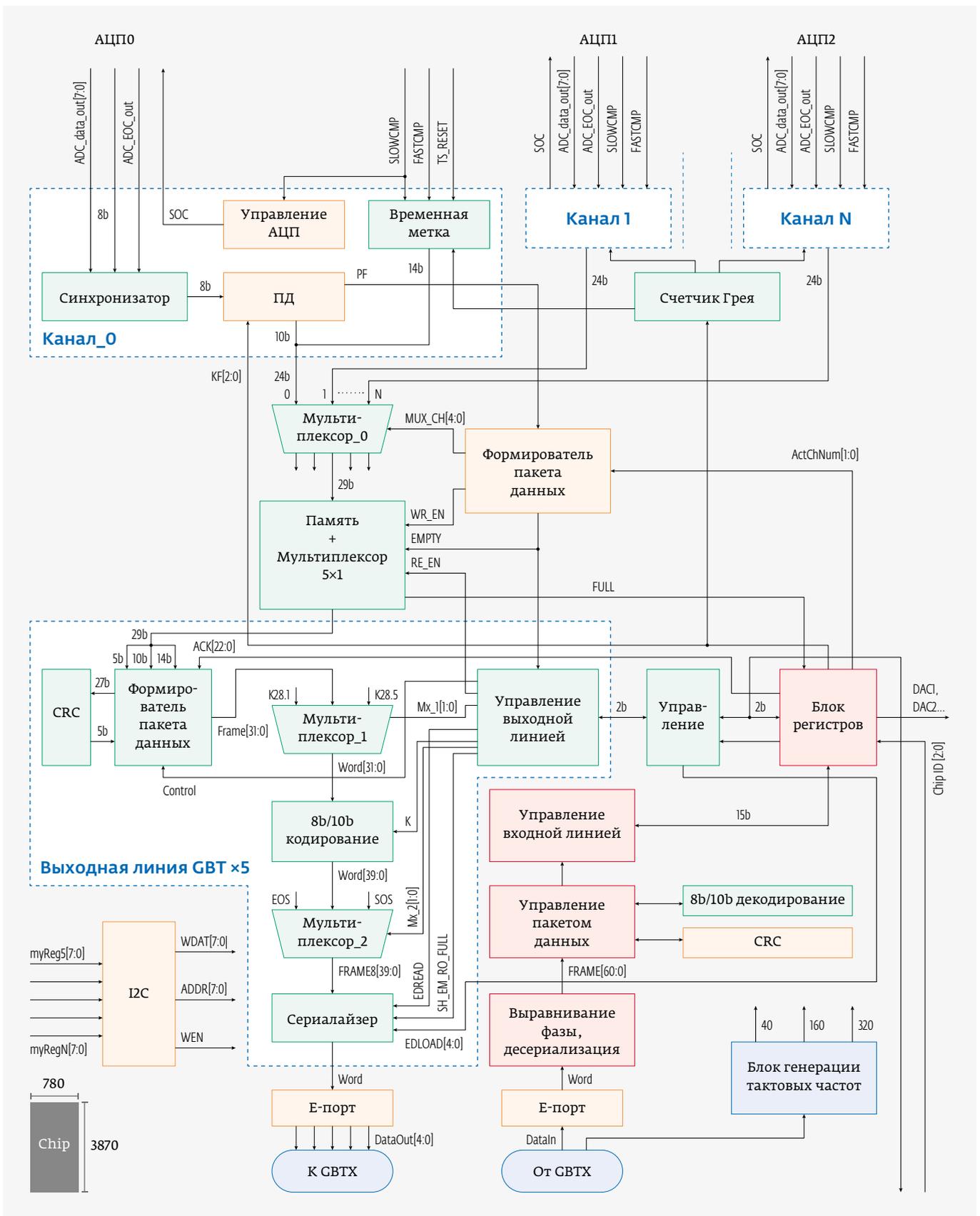
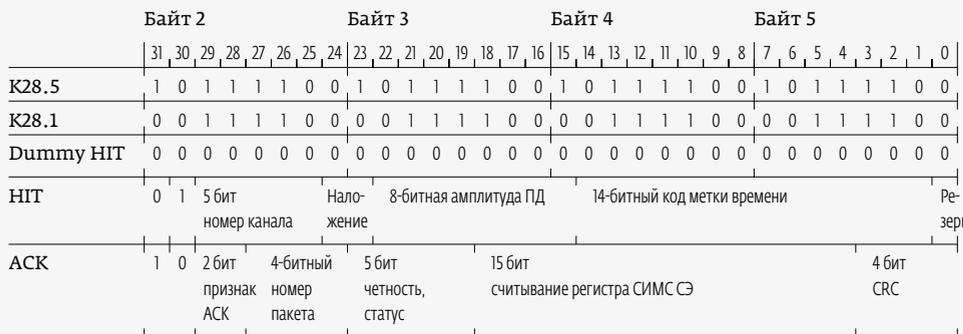


Рис. 4. Цифровая часть СИМС MUCN V4



**Рис. 5.** Структура пакета данных downlink



**Рис. 6.** Структура пакета данных uplink

Символ запятой K28.5 повторяется с частотой 122 Гц и контролирует синхронизацию. 16-битный код CRC-16 0x8005 полинома вида  $P(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$  предназначен для детектирования ошибок (контрольной суммы). 8-битные адреса обеспечивают данными не только соответствующие регистры, в которые записываются коды данных СИМС СЭ, но и регистры специальных функций, например тип сброса (reset) блоков СИМС.

Структура пакета данных uplink HIT (событие) имеет кодирование 8/10 бит и содержит основную информацию. Информация передается при помощи пакета HIT Frame (рис. 6), в который входят: 5-битный номер канала, 14-битный код метки времени, 8-битный код амплитуды сигнала, наличие наложения импульсов на выходе ПД и три резервных бита. Кроме пакета HIT Frame, может передаваться пустой пакет Dummy HIT, содержащий одни нули, который тоже служит для проверки (информация не может быть нулевой). Служебная (сервисная информация) транслируется из СИМС СЭ в GBTx, используя АСК пакет.

Признак АСК пакета означает, что 4-битный номер пакета распознан правильно или неправильно (CRC не совпадает). Один бит отводится для проверки четности. Статус СИМС СЭ показывает: работает ли СИМС правильно или неправильно, совпадает ли контрольная сумма (CRC-16), занята ли память, отсутствуют ли ошибки синхронизации.

В заключении описания интерфейса СИМС СЭ MUCN V4 рассмотрим схемные решения для передатчика

и приемника Е-порта [5]. Основными параметрами приемника и передатчика можно считать быстродействие и потребляемую мощность. Исключение влияния негативных факторов на качество выходного сигнала обеспечивается дифференциальной линией передачи с характеристическим сопротивлением 100 Ом. Снижение потребляемой мощности обеспечивается стандартом Scalable Low Voltage Signaling (SLVS) [2]. Величина тока 2/1,3/0,8/0,5 мА выбирается исходя из требуемого быстродействия (в нашем случае 2 мА). Структура и схема выходного каскада передатчика показаны на рис. 7, 8.

Мощный выходной каскад охвачен отрицательной обратной связью  $V_{oc}$ , корректирующей при помощи операционного усилителя (ОУ) его режимы  $V_{вых. ОУ}$ . Изменяя напряжение на входе ОУ, регулируется ток выходного каскада. Для уменьшения искажений выходного каскада в состав передатчика включена схема на транзисторах M0, M2, M3, практически повторяющая половину выходного каскада с транзисторами, уменьшенными в 20 раз. Это решение снижает потребление передатчика, при этом повторяя положение рабочей точки  $V_{cm}$  выходного каскада. Таким образом получаем потребляемую мощность 4,7 мВт при напряжении питания 1,8 В, время задержки 200 фс, джиттер 50 фс.

Принципиальная схема мощного выходного каскада передатчика построена на МОП-транзисторах n-типа M1-M4 и собрана по мостовой схеме (см. рис. 8). Когда транзисторы M3 и M7 открыты, полярность выходного тока



# Testing & Control

26–28 октября 2021  
МВЦ «Крокус Экспо»

Самая крупная в России международная выставка испытательного и контрольно-измерительного оборудования



[www.testing-control.ru](http://www.testing-control.ru)



Измерительное  
и метрологическое  
оборудование



Оборудование  
для лабораторного  
контроля



Испытательное  
оборудование



Оборудование  
для неразрушающего  
контроля и технической  
диагностики



Производственный  
контроль и машинное  
зрение



Системы диагностики  
и мониторинга

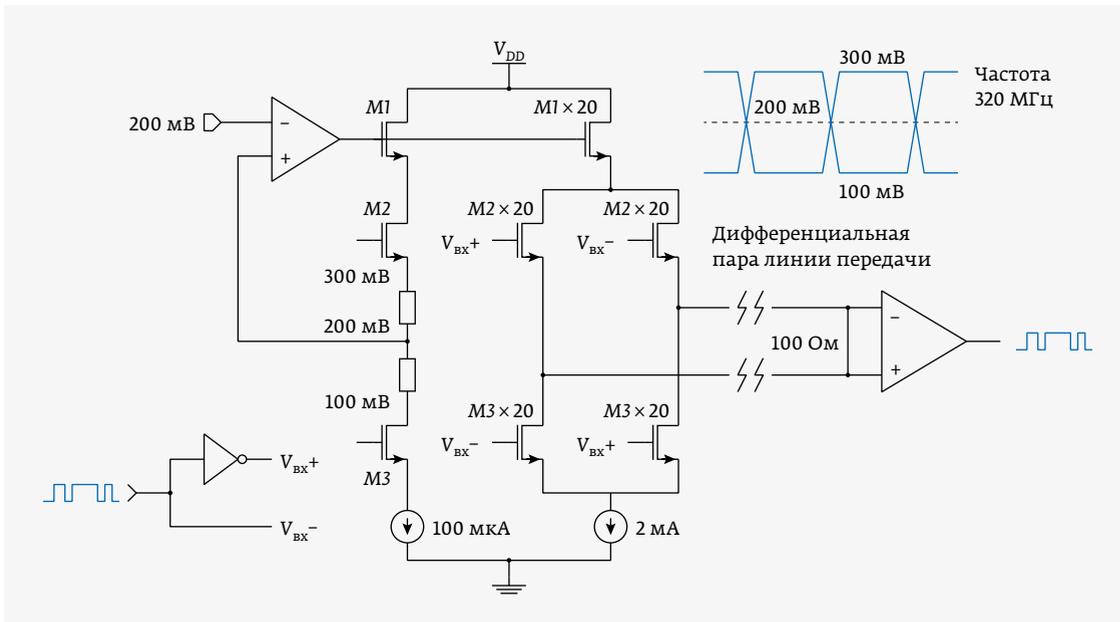
Подробности на сайте  
[www.testing-control.ru](http://www.testing-control.ru)

Организатор



Международная  
Выставочная  
Компания

+7 (495) 252 11 07  
[control@mvk.ru](mailto:control@mvk.ru)



**Рис. 7.**  
Структура передатчика E-порта

и напряжения положительная, когда эти транзисторы закрываются, полярность на выходе изменяется на противоположную. Ток 2 мА обеспечивает скорость передачи данных 320 Мбит/с.

Приемник построен по двухкаскадной схеме (рис. 9). Дифференциальный входной каскад работает в нелинейном режиме. Трехкаскадный буферный блок обеспечивает более высокую прямоугольность (короткие фронт и спад) выходного сигнала. Мощный выход буфера позволяет

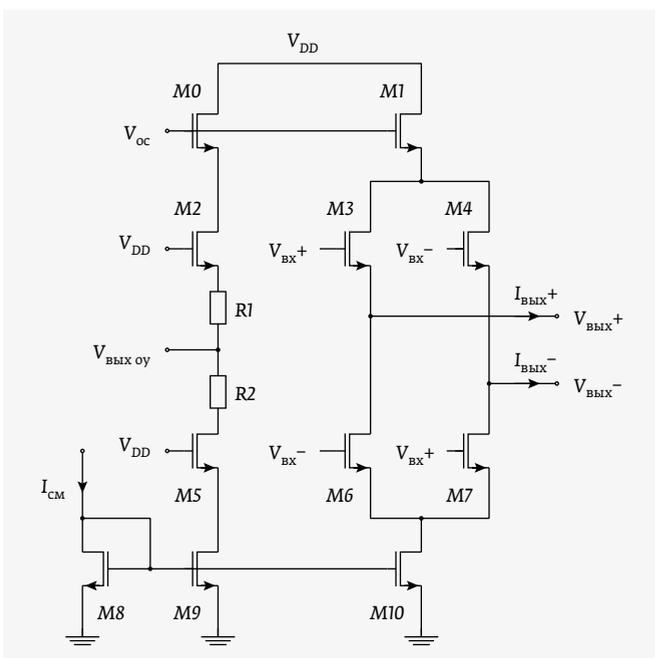
подключить его к тестовой системе для измерения параметров с минимальным влиянием паразитной емкости измерительного щупа.

Изменения напряжения питания от 1,6 до 2,0 В при одновременном изменении температуры от 0 до 60 °С с паразитными элементами на выходе (за базовую линию для передатчика принято напряжение 0 В по переменному току) приводит к пропорциональному изменению выходного напряжения (рис. 10).

Рассмотрев современный интерфейс E-линк, который будет применяться как минимум для СЭ кремниевых детекторов в ЦЕРНе и эксперименте CBM, а также на установках в отечественном проекте NICA (Дубна), можно предположить, что в общем виде интерфейсный блок должен содержать:

- драйверы приема и передачи;
- умножитель / делитель / формирователь тактовых частот;
- блоки синхронизации тактовой частоты и данных;
- формирователи специальных последовательностей;
- формирователь пакета данных;
- блоки проверки синхронизации и правильности приема-передачи данных;
- кодер / декодер данных / команд;
- промежуточный буфер для хранения данных / команд;
- управление интерфейсным блоком, в том числе по внешним командам;
- проверку синхронизации и передачу данных без ошибок либо информации о наличии ошибок.

При конкретной реализации интерфейсного блока некоторые функции могут отсутствовать, что упрощает интерфейс. Однако использование простых интерфейсов



**Рис. 8.** Принципиальная схема выходного каскада передатчика



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ СЕРИЮ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Уникальность этой серии в том, что в редакционный совет вошли крупнейшие специалисты в данной области, которые в силу своих профессиональных обязанностей хорошо представляют как направление развития современных технологий, так и их востребованность в нашей стране. Члены редакционного совета принимают участие и в отборе книг для серии, и в научном редактировании, обеспечивая их высокий уровень. В настоящий момент в серии вышло более 30 книг.



Издательство «ТЕХНОСФЕРА» совместно с Департаментом РЭП Минпромторга РФ приглашает руководителей и специалистов предприятий радиоэлектронной промышленности к участию в издании серии «Мир радиоэлектроники».

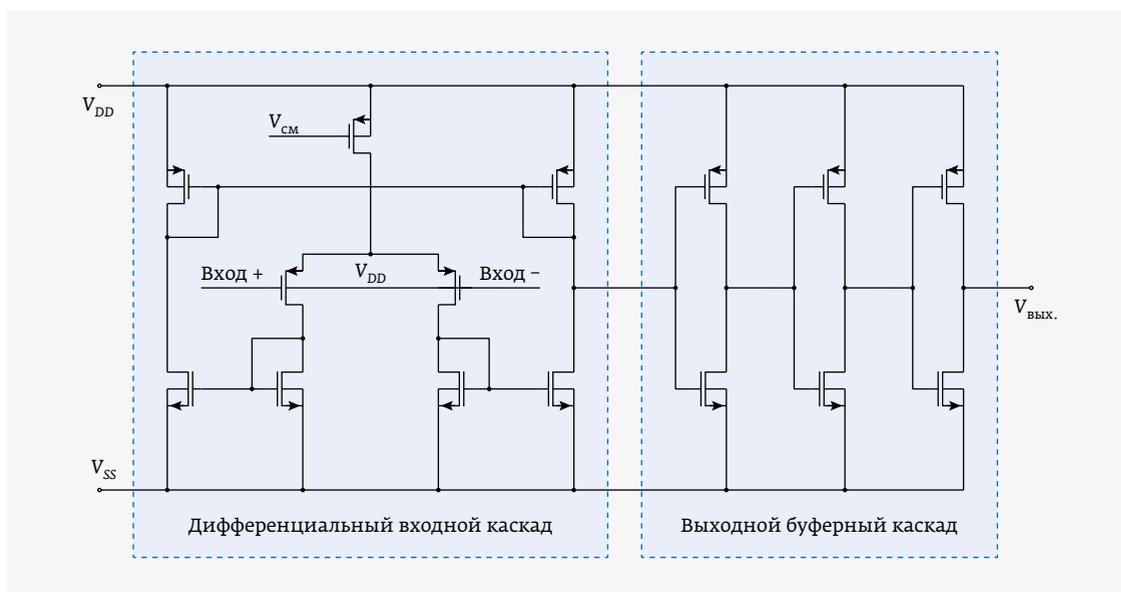


Если у Вас есть желание издать свою книгу или принять участие в научном редактировании переводного издания, направляйте Ваши предложения по адресу [redsovet\\_knigi@electronics.ru](mailto:redsovet_knigi@electronics.ru)

## Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: +7 495 956-33-46  
E-mail: [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru)  
[sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphaera.ru](http://www.technosphaera.ru)



**Рис. 9.**  
Принципиальная схема приемника

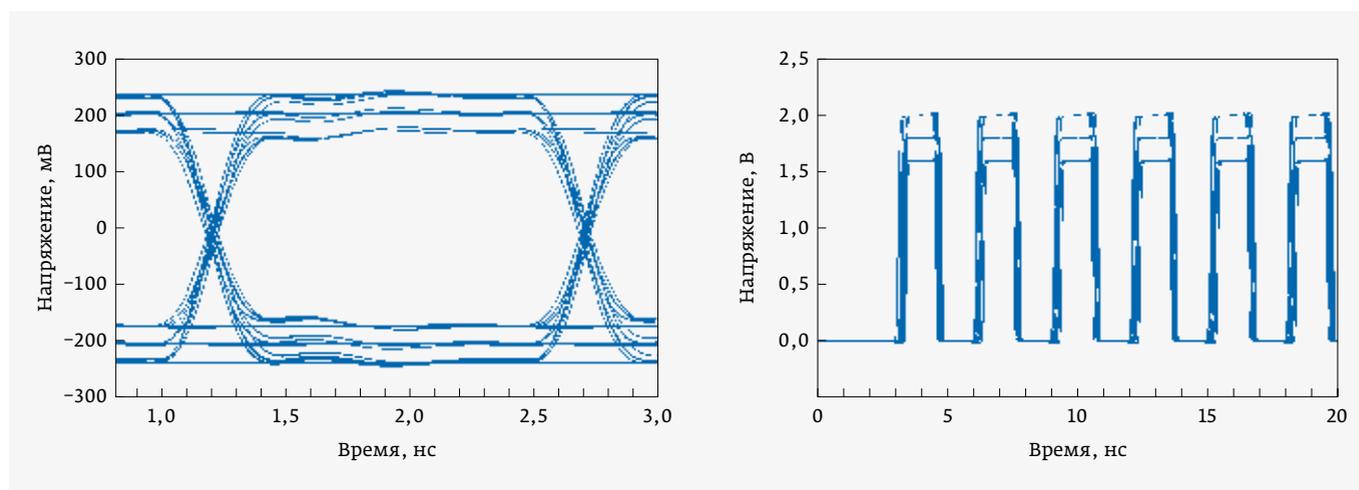
в новых крупных проектах ФВЭ практически невозможно. Это связано с высокими скоростями передачи данных, задержками сигналов и флуктуациями фронтов (джитер), которые без дополнительных опций могут быть сравнимы с периодом тактовой частоты, и, соответственно, серьезно увеличиваются риски искажения передаваемой информации.

\*\*\*

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 18-02-40047 мега.

## ЛИТЕРАТУРА

1. GBTX Manual V0.17 Draft 5/03/2021 // <http://cern.ch/proj-gbt>
2. JEDEC standard: JESD8-13 2001 Scalable Low-Voltage Signaling for 400 mV (SLVS-400) (Solid State Technology Association, Printed in U.S.A)
3. **Kasinski K., Zabolotny W., Szczygiel R.** Interface and protocol development for STS read-out ASIC in the CBM experiment at FAIR. Part of Proc. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. 2014.
4. **Shumkin O. V., Normanov D. D., Ivanov P. Ya., Atkin E. V., Voronin A. G.** Complex function block of processing and transferring asynchronous data for the IC of reading out the signals of multichannel detectors // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2017. V. 798.
5. **Bulbakov I. S., Atkin E. V., Voronin A. G.** High-speed SLVS transmitter and receiver // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2016. V. 675.



**Рис. 10.** Выходные сигналы передатчика (слева) и приемника (справа)



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2 600 руб.

Ян Гибсон, Дэвид Розен, Брент Стакер

## ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

Перевод с англ. книги издательства «Springer»  
под ред. д.ф.-м.н., проф. И.В. Шишковского  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

### *Предисловие к русскому изданию*

Я был очень рад, когда услышал, что профессор Игорь Шишковский будет научным редактором русского издания нашей монографии. Обладая многолетним и богатым опытом в данной области, этот известный ученый и педагог сможет гарантировать как техническую точность, так и ясность изложения. Поскольку русский язык является одним из самых распространенных языков в мире, этот перевод позволит значительно расширить аудиторию, которая сможет впервые получить доступ к данной информации. Я надеюсь, что исследователи, студенты и преподаватели найдут эту книгу прекрасным дополнением к своей коллекции, и что она расширит их познания в быстро развивающихся областях аддитивных технологий.

Брент Стакер  
профессор, университет Луисвилля (Кентукки, США)

### *Содержание*

#### *Предисловие*

- Глава 1.* Введение и описание основных принципов
- Глава 2.* Развитие технологий АП
- Глава 3.* Общая последовательность процесса АП
- Глава 4.* Процесс фотополимеризации в ванне
- Глава 5.* Плавление порошков в сформированном слое
- Глава 6.* Экструзионные системы
- Глава 7.* Распыление материала методом струйной печати
- Глава 8.* Распыление связующего для струйной печати
- Глава 9.* Процессы ламинирования листовых (слоистых) материалов

- Глава 10.* Процессы направленного энерговклада
- Глава 11.* Технологии прямой записи
- Глава 12.* Преимущества бюджетных систем АП
- Глава 13.* Руководство по выбору процесса
- Глава 14.* Постобработка
- Глава 15.* Задачи программного обеспечения в АП
- Глава 16.* Прямое цифровое производство
- Глава 17.* Проектирование для АП
- Глава 18.* Быстрое изготовление инструмента
- Глава 19.* Применения АП
- Глава 20.* Возможности для бизнеса и будущее АП



**ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ:  
[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)**

### **Как заказать наши книги?**

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По телефону: (495) 234-01-10  
E-mail: [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru)  
[sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)