

*Рябиков Дмитрий Сергеевич*¹,
инженер;

*Макаревич Никита Сергеевич*²,
младший научный сотрудник;

*Котов Кирилл Андреевич*³,
техник;

*Козырев Даниил Владимирович*⁴,
техник;

*Мамутова Ольга Вячеславовна*⁵,
старший научный сотрудник, к.т.н.;

*Болсуновская Марина Владимировна*⁶,
доцент, к.т.н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ WHITE RABBIT В ЭКСПЕРИМЕНТЕ SPD

¹ Россия, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», dmitry.ryabikov@spbpu.com

² Россия, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», nikita.makarevich@spbpu.com

³ Россия, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», kirill.kotov@spbpu.com

⁴ Россия, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», daniil.kozyrev@spbpu.com

⁵ Россия, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», olga.mamoutova@spbpu.com

⁶ Россия, Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
marina.bolsunovskaia@spbpu.com

Аннотация. Необходимость анализа больших объемов данных от множества источников измерений при проведении современных экспериментов физики высоких энергий обуславливает необходимость точной синхронизации этих данных. Технология White Rabbit в настоящее время является де-факто стандартной для обеспечения подобной синхронизации. В статье рассмотрена задача построения использующей White Rabbit подсистемы синхронизации для эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA в г. Дубна. Приведены предварительные результаты оценки достижимой точности синхронизации.

Ключевые слова: White Rabbit, синхронизация, тактовый сигнал, ФАПЧ, фаза, фазовое дрожание, ПЛИС, TSS, SPD, NICA.

*Dmitry S. Ryabikov*¹,
Engineer;
*Nikita S. Makarevich*²,
Junior Scientist;
*Kirill A. Kotov*³,
Technician;
*Daniil V. Kozyrev*⁴,
Technician;
*Olga V. Mamoutova*⁵,
Senior Scientist, Candidate of Technical Sciences;
*Marina V. Bolsunovskaya*⁶,
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

WHITE RABBIT TECHNOLOGY IN THE SPD EXPERIMENT

- ¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, dmitry.ryabikov@spbpu.com
² Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, nikita.makarevich@spbpu.com
³ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, kirill.kotov@spbpu.com
⁴ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, daniil.kozyrev@spbpu.com
⁵ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, olga.mamoutova@spbpu.com
⁶ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, marina.bolsunovskaia@spbpu.com

Abstract. In modern high-energy physics experiments, analyzing large volumes of data from multiple distributed detectors requires precise data synchronization. White Rabbit technology has become the standard for such synchronization. This article discusses the construction of a Time synchronization subsystem using White Rabbit for the SPD experiment at the NICA accelerator complex in Dubna. It also presents preliminary results on the achievable synchronization accuracy.

Keywords: White Rabbit, syntonization, synchronization, clock, PLL, phase, jitter, FPGA, TSS, SPD, NICA.

Введение

SPD (Spin Physics Detector) – это один из экспериментов, планирующихся на строящемся в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне укоротительном комплексе NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility). Чтобы исключить возможные искажения в данных планируемых

измерений, система сбора и обработки данных DAQ (Data Acquisition System) в эксперименте SPD должна работать в бестриггерном режиме. В отличие от других экспериментов, где чтение данных с детекторов происходит по общему сигналу-триггеру, который формируется для отбора определенных событий, в SPD все данные детекторов должны передаваться в вычислительный кластер эксперимента, после чего выполняется реконструкция и предварительный отбор наблюдаемых событий (online filter) [1, 2].

При относительно высокой частоте столкновений частиц в эксперименте SPD, которая по оценкам может достигать 6 МГц, и большом числе детекторов (до 700 тысяч чувствительных элементов), необходимость реконструкции событий эксперимента определяет необходимость синхронизации данных. Этой цели в SPD DAQ служит подсистема синхронизации TSS (Time Synchronization System), в задачи которой входит обеспечение синхронности локального времени узлов DAQ. Проставляемые в одинаковом масштабе времени временные метки, которыми аннотируются данные детекторов, позволят на этапе обработки сопоставить друг с другом данные из распределенной сети источников, несмотря на то что передача самих данных до серверов обработки будет выполнена в сети Ethernet с произвольными задержками.

Глобальный тактовый сигнал на каждом элементе SPD DAQ должен иметь относительное отклонение фазы не более 1 нс и фазовое дрожание не более 50 пс. Учитывая такие высокие требования к точности синхронизации, для ее реализации выбрана технология White Rabbit [3]. White Rabbit (WR) – это способ передачи данных о частоте и времени по оптическому каналу связи в сети Ethernet, разработанный в рамках проектов Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) и стандартизованный в IEEE1588-2019. Реализация точной синхронизации в White Rabbit достигается на базе технологии синхронного Ethernet (SyncE), за счет дополнения протокола Precision Time Protocol (PTP) аппаратной реализацией детектора смещения фазы синхросигнала с помощью двухсигментальной время-разностной схемы, имеющей цифровую реализацию на базе ПЛИС (Digital Dual Mixer Time Difference, DDMTD).

В статье описан подход к построению использующей White Rabbit подсистемы синхронизации TSS для эксперимента SPD, представлено описание тестового стенда с использованием оборудования Sync Technology, процедуры калибровки, описание тестовых топологий сети TSS и предварительные результаты оценки достижимой в TSS точности синхронизации.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2024-0033).

1. Подсистема синхронизации эксперимента SPD

1.1. Задача организации данных эксперимента

Собираемые в ходе эксперимента данные измерений аннотируются временными метками и передаются из модулей входной электроники (front-end electronics) в концентраторы первого уровня (L1), после чего по сети Ethernet отправляются на последующую обработку через концентраторы второго уровня (L2).

Временные метки должны назначаться всем собираемым данным в рамках нумерованных кадров (frames), внутри которых данные дополнительно разбиваются на нумерованные фрагменты (slices). Ожидаемая длительность фрагментов составляет от 10 до 100 мкс, кадров – от 0,1 до 10 с. Последовательность таких непрерывно следующих друг за другом кадров формирует пакет кадров (frame batch) в рамках одного набора данных (run).

Данные, разбитые таким образом в разных узлах DAQ и несущие в себе информацию о принадлежности к фрагментам и кадрам, на этапе последующей обработки должны быть сопоставлены друг с другом и собраны в единый массив для каждого фрагмента. Это позволит с достаточной точностью воспроизвести последовательности наблюдаемых в эксперименте событий. Дополнительно, на этапе обработки должна быть возможность сопоставить полученные данные с информацией о поляризации пучка и другими сигналами от ускорителя.

Точность выставления временных меток при этом определяется субнаносекундной точностью глобального тактового сигнала с требованием к его фазовому дрожанию не более 50 пс.

1.2. Архитектура подсистемы TSS

Для описанной организации данных подсистема TSS должна решать задачу распределения среди элементов DAQ глобального тактового сигнала и команд, определяющих структуру фрагментов и кадров.

Задание глобального тактового сигнала для узлов DAQ возможно за счет реализации сети WR, где окончательными узлами выступают концентраторы L1 и TSS-контроллер. Схема такого подключения показана на рисунке 1. Красным цветом на рисунке показаны соединения в сети WR, реализованные по оптическому каналу связи 1000BASE-X.

Всего в сети TSS предполагается до 200 окончательных узлов. Для этого сеть WR, при условии использования стандартных концентраторов с 18 портами, потребует не более двух уровней иерархии сети с древовидной топологией. При этом длина оптических соединений между узлами не будет превышать 100 м, что соответствует требованиям к длине соединений WR.

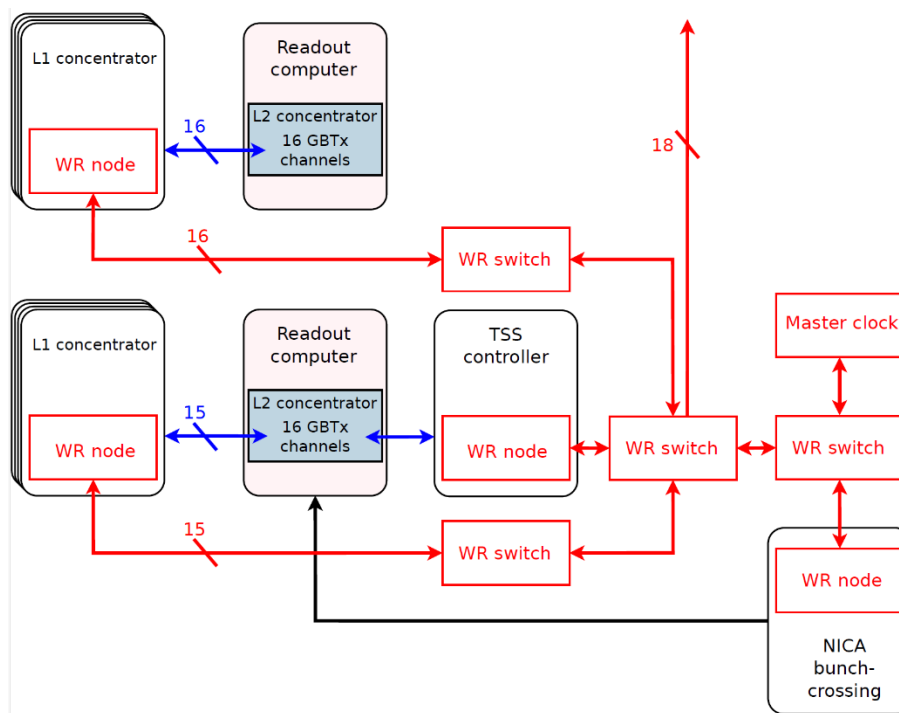


Рис. 1. Структура подсистемы TSS [2]

Для разделения потока данных на кадры и фрагменты должны быть использованы широковещательные синхронные команды, формируемые TSS-контроллером. Преимуществом представленной структуры TSS является возможность передачи команд по тем же Ethernet-соединениям, по которым выполняется синхронизация WR.

Передача синхронных команд предполагается в виде посылок по сети WR от TSS-контроллера к концентраторам L1. При этом синхронные команды могут отправляться в форме расписания, т. е. информация о времени начала нового кадра или фрагмента будет задаваться в виде данных команды, а не временем формирования/получения этой команды.

Таким образом, наличие глобального сигнала тактирования и синхронное получение команд позволит устройствам DAQ выполнять деление данных на кадры и фрагменты в одни и те же моменты времени, и определять временные метки в одном и том же масштабе локального времени. Данные от разных источников в DAQ, аннотированные временными метками описанным способом, на этапе последующей обработки смогут быть сопоставлены с точностью до полупериода глобального сигнала тактирования и с учетом достигнутой точности синхронизации.

Для реализации описанной архитектуры TSS могут быть использованы как коммерчески доступные устройства с поддержкой WR, так и специализированные устройства. В частности, в роли коммутаторов планируются к использованию устройства WRS-18A от компании Sync Technology

(Китай). Для окончательных устройств сети потребуется специализированная реализация, основанная на открытых кодах WR PTP (WRPC) [4].

2. Тестовый стенд

Для оценки достижимой точности синхронизации на ранних этапах проектирования TSS, в лабораторных условиях собран тестовый стенд, позволяющий воспроизвести все возможные участки сети TSS. Стенд включает три коммутатора WRS-18A, а также два окончательных устройства Cute-WR-A7 от компании Sync Technology. Для соединения узлов использованы SFP-приемопередатчики Fiberstore SFP1G-LX-31 1000BASE SFP 1310nm 10km, SyncTechnology GE-LC-1310 1000BASE SFP 1310/1490nm 20km, SyncTechnology GE-LC-1490 1000BASE SFP 1490/1310nm 20km. Для соединений использованы оптоволоконные кабели длиной от 3 до 100 м типа LC/UPC-LC/UPC с одномодовым волокном (SM 9/125 мкм, simplex, 3,0 мм).

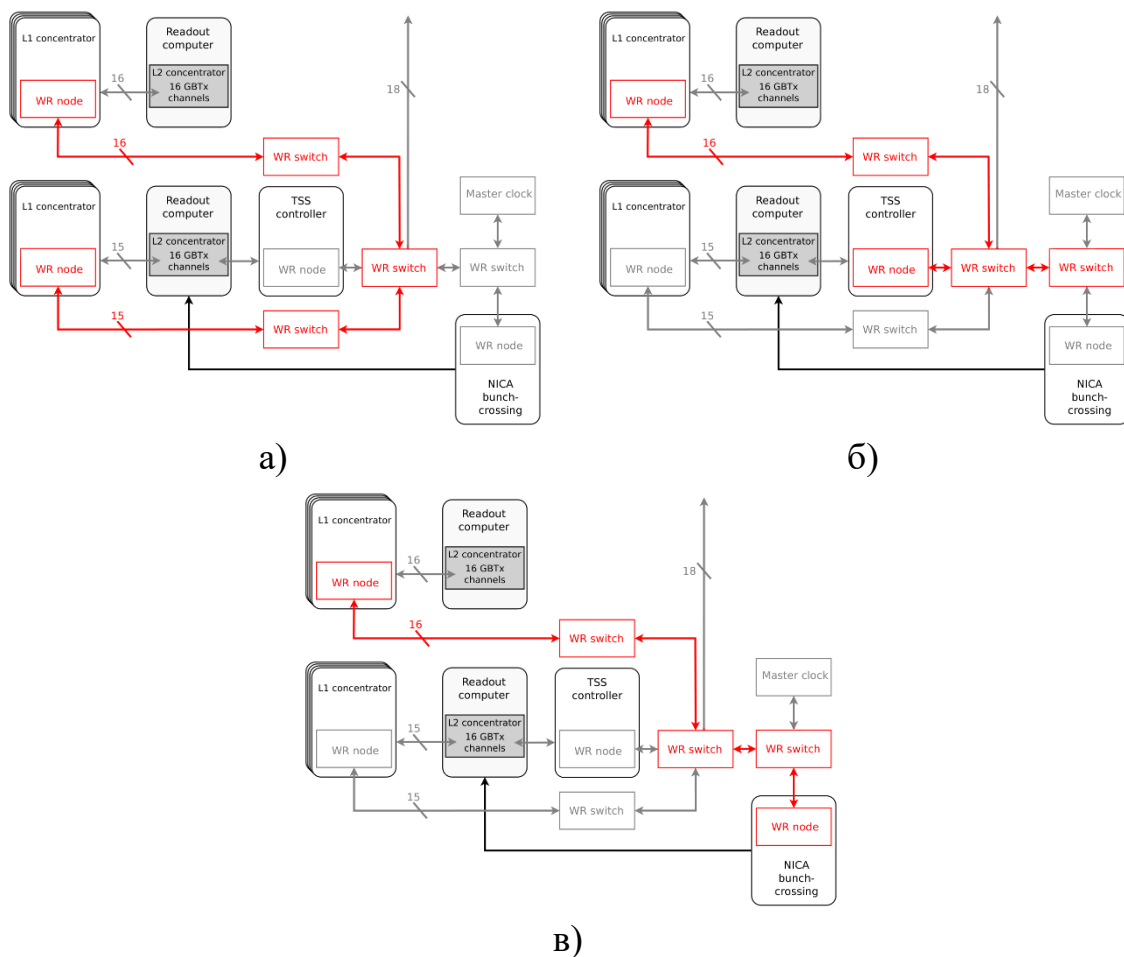


Рис. 2. Тестируемые соединения в TSS

Тестируемые участки TSS включают соединение между двумя коммутаторами L1 через два уровня коммутации WR (рисунок 2, а),

соединение между TSS-контроллером и коммутатором L1 (рисунок 2, б) и соединение между коммутатором L1 и оконечным устройством на ускорителе (рисунок 2, в). Во всех трех случаях в роли задающего глобальный сигнал тактирования выступал коммутатор WRS-18A верхнего уровня.

Далее представлена методика для оценки достижимой точности синхронизации и результаты этой оценки, полученные на тестовом стенде.

3. Результаты оценки точности синхронизации

3.1. Процедура калибровки

Для обеспечения субнаносекундной точности синхронизации в сети WR необходима калибровка. В ходе калибровки для отдельного соединения пары устройств выполняется измерение и сохранение в конфигурации этих устройств величин задержек, вносимых в передачу сигналов схемами приемника, передатчика, SFP-приемопередатчиками, а также асимметрии кабелей.

Для каждой новой пары устройств в тестируемых конфигурациях TSS проведена классическая процедура калибровки WR [5] на базе измерений разности между фронтами сигналов PPS (pulse per second), генерируемых устройствами WR. В роли калибровочной пары использованы два коммутатора WRS-18A с парными SFP модулями Sync Technology и волоконно-оптический кабель 3 м. Учитывая используемые приемопередатчики и предполагаемую длину соединений в сети TSS, оценка асимметрии кабеля не проводилась, поскольку ее влиянием на точность синхронизации можно пренебречь [6]. Для одинаковых портов одинаковых устройств повторная калибровка не выполнялись и использованы настройки, полученные при первичной калибровке. Возможная потеря точности синхронизации при этом компенсируется существенным сокращением времени настройки тестового стенда, поскольку калибровка одного порта при использовании рекомендованной итеративной процедуры занимает до 30 минут.

3.2. Методика измерения относительной задержки и фазового дрожания

Для выполнения измерений использован цифровой осциллограф Rohde & Schwarz RTO2044. Все измерения проводились при одинаковой комнатной температуре, на полностью прогретом оборудовании, при частоте отсчетов равной 20 ГГц с использованием линейной интерполяции. Выходы PPS всех устройств подключались к осциллографу одинаковыми проводами.

Для оценки временной задержки [Δt] между двумя фронтами PPS, т.е. разности фаз сигналов, использована встроенная функция осциллографа

для измерения задержки Delay, с настройкой на измерение на уровнях сигналов 50%. Измерение разности фаз для каждой тестовой конфигурации выполнялось для двух оконечных устройств относительно коммутатора, задающего частоту.

Для оценки относительного фазового дрожания σ сигнала PPS отдельного оконечного устройства так же измерялась разница фаз между сигналом PPS задающего частоту коммутатора и сигналом PPS оконечного устройства. Фазовое дрожание оценивалось согласно стандарту IEEE 181-2011 как среднеквадратичное отклонение измеренной разности фаз, для выборки объемом 10 тысяч отсчетов.

Анализ проведенных измерений выполнялся с учетом собственной точности осциллографа, имеющего для проведенных измерений временных интервалов ошибку не более 21 пс и собственный порог фазового дрожания 600 фс. Также учитывалось, что заявленное фазовое дрожание внутреннего генератора коммутатора WRS-18A не превышает 10 пс.

3.3. Результаты

Все протестированные конфигурации показали достаточную точность синхронизации фаз тактовых сигналов. В таблице 1 представлены результаты оценки точности синхронизации для конфигурации с максимальным числом коммутаторов, подключенных между двумя оконечными устройствами (рисунок 2, в), где первое оконечное устройство подключено к коммутатору верхнего уровня иерархии, второе – к коммутатору нижнего уровня иерархии.

Таблица 1

**Измеренные характеристики сигналов PPS
для двух оконечных устройств WR**

| Оконечное устройство | $[\Delta t]$, пс | σ , пс |
|----------------------|-------------------|---------------|
| Cute-WR-A7 №1 | 6,5 | 10,86 |
| Cute-WR-A7 №2 | 158 | 11,6 |

Известно, что технология WR автоматически компенсирует температурные колебания времени прохождения сигналов по кабелям. Однако откалиброванные задержки приемников и передатчиков также меняются при изменении температуры окружающей среды. Для оценки влияния такого изменения температуры на задержку Δt проведен эксперимент с нагревом коммутатора верхнего уровня. На рисунке 3 показана наблюдаемая зависимость величины задержки Δt от температуры при нагреве до 60 °С для оконечного узла Cute-WR-A7 №1. Измерение температуры проводилось по показаниям встроенного датчика температуры ПЛИС. При

нагреве в диапазоне от 37 до 60 °С величина Δt изменилась на 260 пс. Таким образом, даже при существенном колебании температуры коммуникационного оборудования задержка остается в требуемых границах субнаносекундной точности.

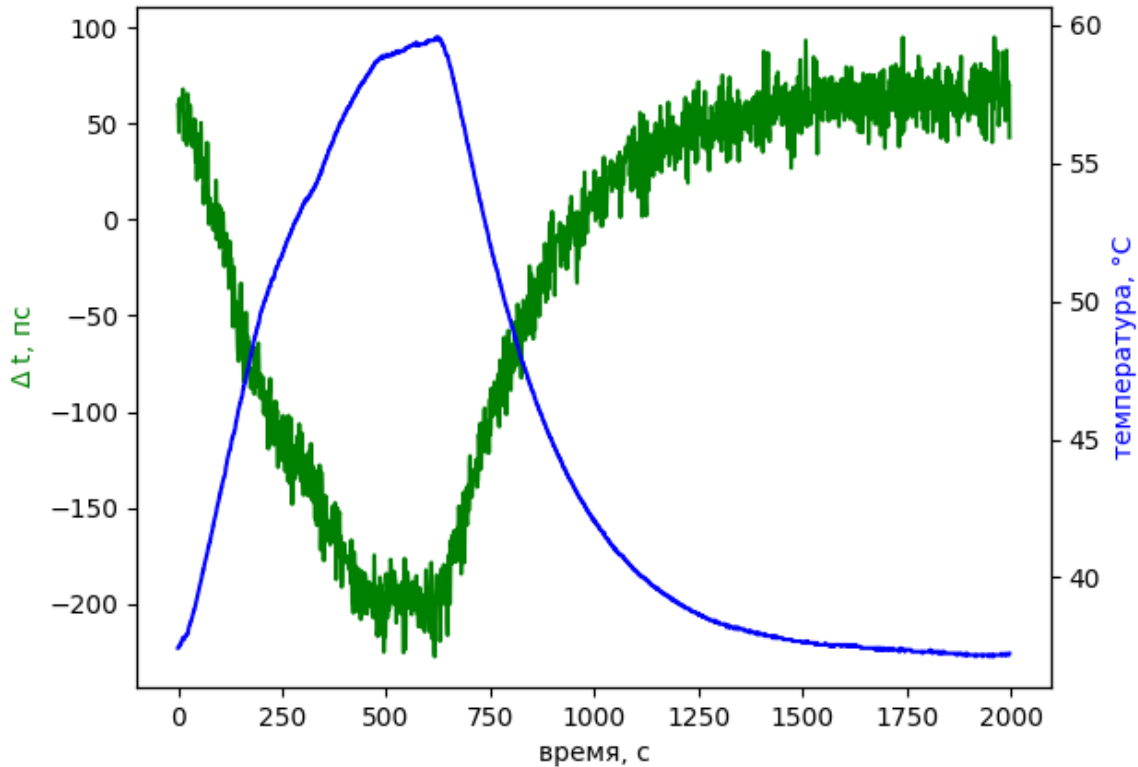


Рис. 3. Изменение фазы сигнала PPS при изменении температуры коммутатора

Аналогично технология WR автоматически компенсирует изменение длины кабеля между узлами сети. Однако в тестовой конфигурации сети не проведена калибровка асимметрии волоконно-оптического кабеля. Поэтому для оценки влияния изменения длины кабеля на задержку Δt проведен дополнительный эксперимент с небольшим объемом выборки (600 значений) для длин кабеля 10 м и 100 м. На рисунке 4 представлены гистограммы для двух выборок, показывающие, что соответствующее изменение задержки $[\Delta t]$ составило около 50 пс.

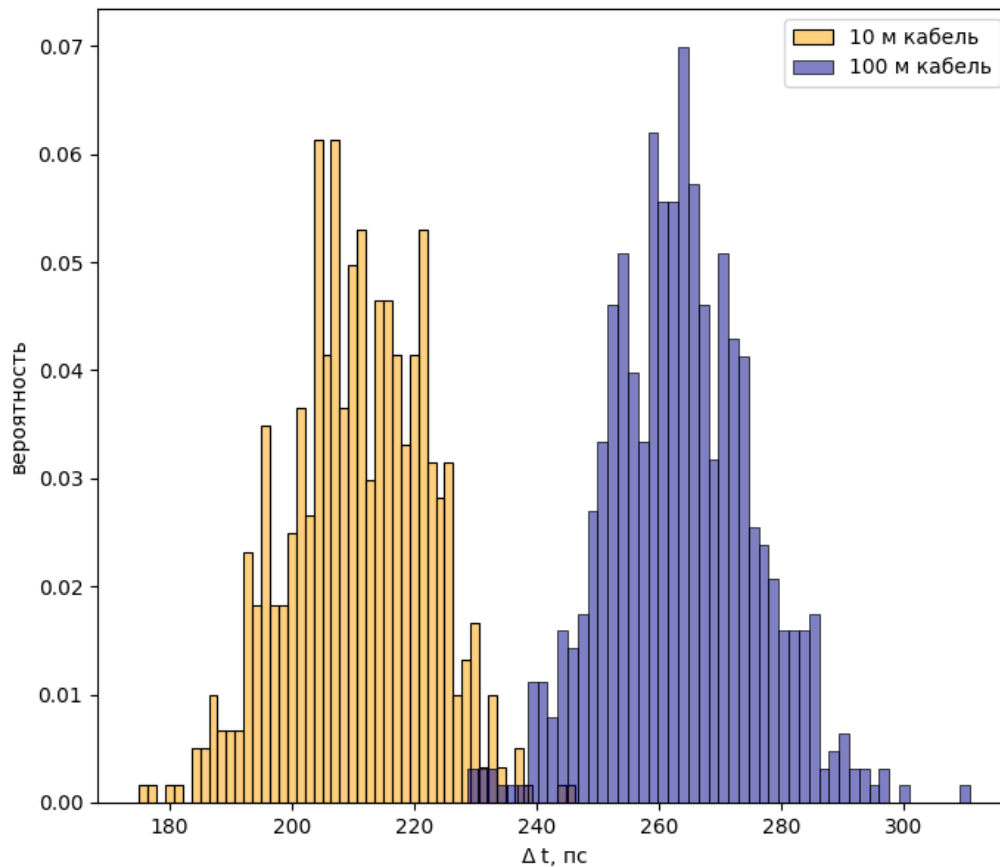


Рис. 4. Гистограммы для фазы сигнала PPS при изменении длины волоконно-оптического кабеля

Таким образом, для узлов сети WR, построенной на базе оборудования Sync Technology, в которой предварительно проведена калибровка настроек приемников и передатчиков устройств, но не выполнена калибровка асимметрии кабеля, достигается требуемая точность синхронизации, предъявляемая к узлам SPD TSS. Изменение фаз синхросигналов при изменении длин кабелей и температуры окружающей среды не приводит к нарушению этих требований.

Заключение

Для определения достижимой точности синхронизации для будущей подсистемы SPD TSS использованы коммутаторы WRS-18A и оконечные устройства CuteWR-A7 в различных вариантах подключения, соответствующих целевой топологии TSS. Выполненные с помощью высокоточного измерительного оборудования тесты показали достаточную точность синхронизации, соответствующую требованиям DAQ SPD.

Дальнейшие оценки точности синхронизации планируется проводить для специализированных для подсистемы TSS оконечных устройств, в частности TSS-контроллера и коммутаторов DAQ L1. Устройства Cute-WR-A7 могут быть рекомендованы для дальнейшего прототипирования узлов сети TSS.

Список литературы

1. The SPD Collaboration. Conceptual design of the Spin Physics Detector / Abazov V.M. et al. – arXiv, 2021. – 194 с. – (Препринт). – URL: <http://arxiv.org/abs/2102.00442> (дата обращения: 06.06.2024)
2. The SPD Collaboration. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / Abazov V.M. et al. – arXiv, 2024. – 362 с. – (Препринт). – URL: <http://arxiv.org/abs/2404.08317> (дата обращения: 06.06.2024)
3. Daniluk G., Wlostowski T. White Rabbit: Sub-Nanosecond Synchronization for Embedded Systems // Proceedings of the 43rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Long Beach, California, 2011. – Pp. 45–60.
4. wrpc release v5.0 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ohwr.org/project/wr-cores/-/wikis/wrpc-release-v5.0> (дата обращения: 06.06.2024).
5. Daniluk G. White Rabbit calibration procedure [Электронный ресурс]. – URL: https://white-rabbit.web.cern.ch/documents/WR_Calibration-v1.1-20151109.pdf (дата обращения: 06.06.2024).
6. Dierikx E., Xie Y. WR good practice guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Documents/wr-good-practice-guide> (дата обращения: 06.06.2024).

Сведения об авторах

Автор 1

Вид участия: очное (in person) онлайн (online)

1. Фамилия Имя Отчество: Рябиков Дмитрий Сергеевич
2. E-mail: dmitry.ryabikov@spbpu.com
3. Контактный телефон: +7-921-0973637
4. Страна, город: Россия, Санкт-Петербург
5. Место работы (полное официальное название организации): ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
6. Должность: инженер
7. Ученая степень: -
8. Ученое звание: -

Автор 2

Вид участия: очное (in person) онлайн (online)

1. Фамилия Имя Отчество: Макаревич Никита Сергеевич
2. E-mail: nikita.makarevich@spbpu.com
3. Контактный телефон: +7-981-8764826
4. Страна, город: Россия, Санкт-Петербург

5. Место работы (полное официальное название организации): ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

6. Должность: младший научный сотрудник

7. Ученая степень: -

8. Ученое звание: -

Автор 3

Вид участия: очное (in person) онлайн (online)

1. Фамилия Имя Отчество: Котов Кирилл Андреевич

2. E-mail: kirill.kotov@spbpu.com

3. Контактный телефон: +7-922-9402614

4. Страна, город: Россия, Санкт-Петербург

5. Место работы (полное официальное название организации): ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

6. Должность: техник

7. Ученая степень: -

8. Ученое звание: -

Автор 4

Вид участия: очное (in person) онлайн (online)

1. Фамилия Имя Отчество: Козырев Даниил Владимирович

2. E-mail: daniil.kozyrev@spbpu.com

3. Контактный телефон: +7-953-3551260

4. Страна, город: Россия, Санкт-Петербург

5. Место работы (полное официальное название организации): ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

6. Должность: техник

7. Ученая степень: -

8. Ученое звание: -

Автор 5

Вид участия: очное (in person) онлайн (online)

1. Фамилия Имя Отчество: Мамутова Ольга Вячеславовна

2. E-mail: olga.mamoutova@spbpu.com

3. Контактный телефон: +7-911-2139626

4. Страна, город: Россия, Санкт-Петербург

5. Место работы (полное официальное название организации): ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

6. Должность: старший научный сотрудник

7. Ученая степень: к.т.н.

8. Ученое звание: -

Автор 6

Вид участия: очное (in person) онлайн (online)

1. Фамилия Имя Отчество: Болсуновская Марина Владимировна
2. E-mail: marina.bolsunovskaia@spbpu.com
3. Контактный телефон: +7-921-3484182
4. Страна, город: Россия, Санкт-Петербург
5. Место работы (полное официальное название организации): ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
6. Должность: доцент
7. Ученая степень: к.т.н.
8. Ученое звание: -

Сведения об авторах на английском языке

Author 1

1. First Name, Last Name (имя и фамилия на английском): Dmitry S. Ryabikov
2. Country, city: Russian Federation, Saint Petersburg
3. Place of work (название организации на английском): Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
4. Position (должность на английском): Engineer
5. Degree (ученая степень на английском): -

Author 2

1. First Name, Last Name (имя и фамилия на английском): Nikita S. Makarevich
2. Country, city: Russian Federation, Saint Petersburg
3. Place of work (название организации на английском): Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
4. Position (должность на английском): Junior Scientist
5. Degree (ученая степень на английском): -

Author 3

1. First Name, Last Name (имя и фамилия на английском): Kirill A. Kotov
2. Country, city: Russian Federation, Saint Petersburg
3. Place of work (название организации на английском): Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
4. Position (должность на английском): Technician
5. Degree (ученая степень на английском): -

Author 4

1. First Name, Last Name (имя и фамилия на английском): Daniil V. Kozyrev
2. Country, city: Russian Federation, Saint Petersburg
3. Place of work (название организации на английском): Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
4. Position (должность на английском): Technician
5. Degree (ученая степень на английском): -

Author 5

1. First Name, Last Name (имя и фамилия на английском): Olga V. Mamoutova
2. Country, city: Russian Federation, Saint Petersburg
3. Place of work (название организации на английском): Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

4. Position (должность на английском): Senior Scientist
5. Degree (ученая степень на английском): Candidate of Technical Sciences

Author 6

1. First Name, Last Name (имя и фамилия на английском): Marina V. Bolsunovskaya
2. Country, city: Russian Federation, Saint Petersburg
3. Place of work (название организации на английском): Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
4. Position (должность на английском): Associate Professor
5. Degree (ученая степень на английском): Candidate of Technical Sciences