

Экспериментальные исследования макета системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени

О. В. КОЛМОГОРОВ, С. С. ДОНЧЕНКО, Д. В. ПРОХОРОВ, С. Г. БУЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: prokhorov@vniiftri.ru

Описан макет системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов с помощью оптоволоконной линии связи. Приведены результаты испытаний макета и экспериментальных исследований. Определены погрешности сравнения шкал времени и максимальная дальность работы системы.

Ключевые слова: сравнение шкал времени, синхронизация, передача шкалы времени.

A model of the unilateral and bilateral comparisons system used for comparison and synchronization of the time scales of distant terrestrial objects by means of a fiber-optic link is described. The model test results and experimental research results of estimation of the time scales comparison accuracy, as well as a maximum range of the system are presented.

Key words: comparison of time scales, synchronization, time transfer.

При создании средств метрологического обеспечения глобальной навигационной системы (ГНС) ГЛОНАСС одной из основных задач является разработка высокоточных средств сравнения и синхронизации шкал времени (ШВ) удалённых объектов. К современным требованиям, предъявляемым к средствам метрологического обеспечения ГНС ГЛОНАСС, относится синхронизация ШВ удалённых объектов в режиме реального времени с инструментальной погрешностью не более 100 пс.

В настоящее время наилучшую точность синхронизации ШВ удалённых объектов обеспечивает применение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [1]. Различные способы синхронизации позволяют достигнуть погрешности синхронизации от 50 пс на дистанциях до 5 км и до 100—120 пс на дистанциях порядка 100 км. Однако недостатки существующих методов синхронизации ШВ с использованием ВОЛС ограничивают точность и возможность применения ГНС [2]. К таким недостаткам относятся: невозможность с достаточной точностью учитывать задержки сигнала в оптических волокнах; сложность обеспечения равенства длин двух оптических волокон в кабеле ВОЛС и др. Это привело к необходимости разработки системы синхронизации ШВ, использующей только одно оптическое волокно и не зависящей от задержки сигнала в текущий момент времени.

Конструкция системы одно- и двухсторонних сравнений (СОДС) ШВ с использованием ВОЛС для синхронизации ШВ двух удалённых объектов предложена в [2, 3]. Особенности СОДС ШВ: применение одного оптического волокна; алгоритмическое исключение времени прохождения оптического импульса в волокне; исключение влияния нестабильности временного положения фронтов импульсов генератора и лазерного передающего модуля на точность сравнения; возможность поэлементной калибровки системы.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований макета СОДС ШВ. В каче-

стве таймеров событий в рассматриваемой функциональной схеме макета использованы простые и распространённые двухканальные одностоповые измерители временных интервалов (ИВИ), с помощью которых измеряют время между импульсами ШВ (импульс «старт») и фотоприёмника (импульс «стоп»). Схема экспериментальной установки для испытаний макета показана на рис. 1. Использование одностоповых ИВИ приводит к необходимости разделения канала, служащего для измерений моментов времени излучения и прихода отражённого оптического импульса, на два отдельных. Это приводит к необходимости включения в схему дополнительного фотоприёмного модуля, усилителя и ИВИ.

Достоинством такого решения является снижение стоимости системы и уменьшение зоны её нечувствительнос-

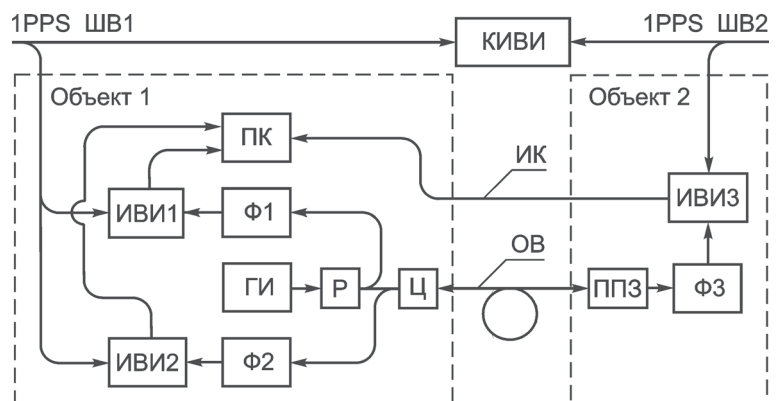


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1PPS ШВ1, 1PPS ШВ2 — сигналы секундных меток ШВ объектов 1, 2; КИВИ — контрольный измеритель временных интервалов; ИК — информационный канал; ОВ — оптическое волокно; ГИ — генератор оптических импульсов; Р — разветвитель; Ц — циркулятор; ППЗ — полупрозрачное зеркало; Ф1—Ф3 — фотоприёмники; ИВИ1—ИВИ3 — измерители временных интервалов; ПК — компьютер

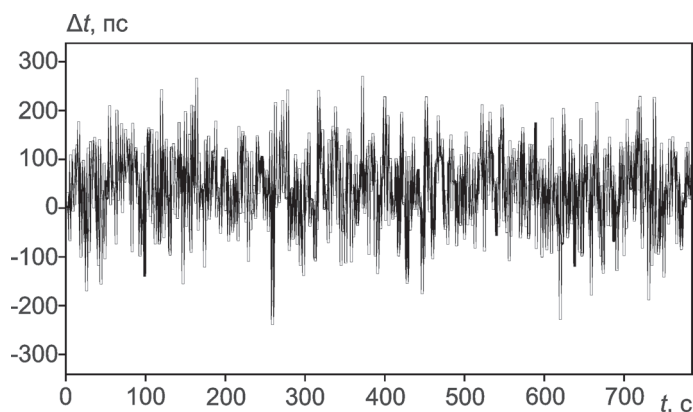


Рис. 2. Разность Δt результатов измерений расхождения шкал времени с применением макета СОДС и контрольного ИВИ

ти, т. е. минимального расстояния, на котором может работать система. Недостаток заключается в увеличении случайной погрешности определения расхождения ШВ в результате невозможности проведения многократных измерений для сравнения двух импульсов ШВ первого и второго объектов, а также в появлении погрешности, обусловленной неидентичностью двух каналов.

В рассматриваемом эксперименте обе части СОДС ШВ, предназначенные для размещения на различных объектах, располагались в одном помещении с целью проверки результатов работы системы с помощью контрольного ИВИ КИВИ. В качестве шкал времени ШВ1, ШВ2 использовали сигналы 1PPS, сформированные двумя различными стандартами частоты. Части СОДС ШВ были соединены ВОЛС, проложенной между двумя зданиями в виде шлейфа в обе стороны, общей длиной 2,8 км.

Расположенный на первом объекте генератор оптических импульсов ГИ излучает импульсы частотой 1 Гц в оптическое волокно ОВ, при этом часть их мощности с помощью разветвителя Р поступает на первый фотоприёмник Ф1. Измеритель ИВИ1 фиксирует время излучения оптического импульса в ШВ первого объекта ШВ1. Прошедший по оптическому волокну импульс поступает через полупрозрачное зеркало ППЗ на фотоприёмник второго объекта Ф3. Измеритель ИВИ3 второго объекта фиксирует время прихода оптического импульса с первого объекта в ШВ второго объекта ШВ2. По информационному каналу ИК, например сети Ethernet, значение времени прихода импульса передаётся на компьютер ПК, расположенный на первом объекте. Часть мощности импульса, прошедшего через оптическое волокно на второй объект, отражается от полупрозрачного зеркала и возвращается на первый объект, где с помощью циркулятора Ц поступает на второй фотоприёмник Ф2. Измеритель ИВИ2 фиксирует время прихода отражённого оптического импульса в ШВ первого объекта ШВ1. Информация о моментах излучения импульса и прихода отражённого импульса с измерителей ИВИ1, ИВИ2 передаётся в ПК. На основании измеренных значений определяют расхождение ШВ объектов.

В течение секундного цикла проводили только одно измерение, расхождение ШВ для каждого i -го измерения определяли по формуле [2]:

$$\Delta T_i = T_i^{\text{II}} - (T_i^{\text{I}} + T_i^{\text{I}2})/2 + \tau_3,$$

где T_i^{I} — момент излучения импульса в ШВ первого объек-

та; T_i^{II} — момент приёма импульса в ШВ второго объекта;

$T_i^{\text{I}2}$ — момент приёма отражённого импульса в ШВ первого объекта; τ_3 — поправка, учитывающая задержки в аппаратуре.

Контрольным ИВИ измеряли расхождения ШВ первого и второго объектов. Разрешающая способность ИВИ составляла 25–50 пс. Для работы с аппаратурой и обработки результатов измерений был создан программный комплекс, предназначенный для расчёта расхождения ШВ и калибровки системы с помощью контрольного ИВИ.

В ходе эксперимента было оценено изменение расхождения $x(t)$ ШВ за интервал времени наблюдений. Полученные результаты аппроксимированы линейной зависимостью $x(t) = a + bt$, где a — смещение ШВ в момент начала измерений, b — коэффициент, характеризующий скорость изменения расхождения шкал. Значения коэффициентов b , вычисленные с помощью макета СОДС ШВ и контрольного ИВИ, отличаются не более чем на $\pm 1 \cdot 10^{-16}$. Разность результатов измерений Δt расхождения ШВ приведена на рис. 2.

Для оценки погрешностей измерений расхождения ШВ с применением макета СОДС ШВ был выбран временной интервал с незначительными флуктуациями температуры. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений не превысило 79 пс, а СКО результатов измерений с помощью контрольного ИВИ, используемого в качестве эталонного, составило не более 33 пс.

Также в ходе проведения эксперимента была определена максимальная дальность работы системы. В линию связи вносили дополнительное ослабление с помощью перестраиваемого оптического аттенюатора. Ослабление соответствовало заданной длине типового оптического волокна. Установлено, что максимальная дальность работы системы при использовании лазерных и фотоприёмных модулей ВОЛМ-10 и ВОФМ-10 (производство Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси) для оптического волокна SMF-28 составляет 30 км. Как правило, этого достаточно для применения систем синхронизации в пределах полигонов и измерительных комплексов. Продолжительность одиночного измерения при длине оптического волокна 30 км составляет не более 0,3 мс, что исключает влияние температурных и вибрационных флуктуаций на изменение оптической длины пути в ВОЛС за время измерений. При использовании многостоповых таймеров событий малый интервал времени, образующий мёртвую зону между единичными измерениями, обеспечивает возможность проведения многократных сравнений ШВ в течение секундного цикла с частотой до 3 кГц.

Систематическая погрешность СОДС ШВ обусловлена погрешностью определения задержек сигнала в её составных частях (оптоволоконных элементах, кабелях связи, электронных устройствах). Задержки определяли с помощью средств измерений, входящих в состав комплекса аппаратуры контроля характеристик оптического излучения и структуры сигнала [4], с погрешностью 10–20 пс.

Таким образом, подтверждена возможность синхронизации ШВ пространственно-разнесённых объектов со средним квадратическим отклонением, не превышающим

70—80 пс, при расстоянии между объектами до 30 км. Определены пути повышения точности синхронизации, предполагающие использование в составе системы сравнения ШВ более точных средств измерений, проведение в течение секундного цикла множества измерений и накопление результатов измерений с их усреднением.

Л и т е р а т у р а

1. Rost M., Piester D., Yang W., Feldmann T., Wübbena T., Bauch A. Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // *Metrologia*. 2012. V. 49. N. 6. P. 772—779.

2. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // *Измерительная техника*. 2015. № 1. С. 14—17.

3. Пат. 2 547 662 РФ. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления / О. В. Колмогоров, Д. В. Прохоров // *Изобретения. Полезные модели*. 2015. № 10.

4. Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Комплекс аппаратуры контроля характеристик оптического излучения и структуры сигнала // *Оптические системы и технологии: Тез. докл. IX междунар. форума*. 2013. С. 54.

Дата принятия: 09.02.2016.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

539.1.05+621.039.5+621.384.3

Применение методов инфракрасной синхротронной диагностики пучков частиц ускорительного комплекса JINR/NICA

А. А. МАЛЫЦЕВ¹, М. В. МАЛЫЦЕВА²

¹ Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия, e-mail: amaltsev@cv.jinr.ru

² АО «ТЕНЗОР», Дубна, Россия, e-mail: mmaslova-44@yandex.ru

Рассмотрена возможность применения и развития методов и систем инфракрасной синхротронной ускорительной диагностики при исследованиях быстротекающих процессов в проекте Объединённого института ядерных исследований современного комплекса сверхпроводящих ускорителей с коллайдером тяжёлых ионов NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility). Исследовано магнитно-тормозное излучение на встречных пучках релятивистских заряженных частиц. Предложена методика обнаружения магнитно-тормозного синхротронного и когерентного излучений комплекса JINR/NICA.

Ключевые слова: ускорители, NICA, инфракрасная синхротронная ускорительная диагностика, моделирование процессов, ядерно-энергетическая установка, системы контроля и управления, системы сбора и обработки информации.

The possibility of the use and development of methods and systems Infrared Synchrotron Accelerator Diagnostics in a project of the Joint Institute for Nuclear Research of the modern complex superconducting accelerators Heavy Ion Collider NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility).

The review of paper devoted to investigation of phenomenon of coherent magnetic-bremsstrahlung soft photon emission at high-energy collisions of bunches in colliders is given. Some characteristic properties and possibility to apply this phenomenon to the diagnostics of beams also discussed.

Key words: accelerators, NICA, infrared synchrotron accelerator diagnostics, process modeling, electronuclear installation, monitoring and control systems, processing information systems.

Качество современного ускорительного эксперимента непосредственно зависит от точного и строгого выполнения требований, предъявляемых к ускоряемому пучку (сгустку) элементарных заряженных частиц. Проблема контроля и регулирования пучка в процессе ускорения актуальна для всех ускорителей, особенно для вновь создаваемых. Приоритет в развитии существующих методов диагностики пучков и разработке новых принадлежит бесконтактным неразрушающим методам, что, в свою очередь, делает необходимым создание соответствующих детектирующих информационно-измерительных систем для реализации этих методов.

Один из перспективных методов неразрушающей бесконтактной диагностики основан на использовании собственного электромагнитного излучения пучков релятивистских элементарных частиц (эффекта синхротронного излучения) [1]. Синхротронное или магнитно-тормозное (краевое, ондуляторное, bremsstrahlung) излучение возникает при отклонении магнитным полем заряженной частицы от прямолинейного пути, в частности — при движении частицы в поле поворотных магнитов синхротрона или в специально созданном пространственно-периодическом магнитном поле (ондулятор, виглер).