

Система контроля синхронизации радиотелескопов РСДБ-комплекса «Квазар-КВО»

©А. В. Вытнов, Д. В. Иванов, А. А. Махнач,
А. С. Карпичев, А. А. Царук

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Условие получения качественных результатов РСДБ-наблюдений — высокоточная синхронизация работы аппаратуры радиотелескопов. Применение специальных аппаратных и программных средств позволяет осуществлять высокоточные сличения опорных частот и сигналов времени, необходимых для работы радиоинтерферометрического комплекса. Источник высокоточных сигналов на радиотелескопах — стандарты времени и частоты. Система контроля частотной и временной синхронизации на основе получаемых данных позволяет поддерживать параметры опорных сигналов хранителя времени и частоты. Одна из задач системы — минимизация потерь синхронизации, возникающих при передаче сигналов потребителю на радиотелескоп.

В статье представлена структура системы контроля синхронизации радиотелескопов, описаны способы сбора данных и управления хранителями времени и частоты в реальном времени. Наглядно представлены результаты сличений и мониторинга сигналов опорной частоты и шкал времени.

Ключевые слова: РСДБ, сличения шкал времени, синхронизация, РСДБ-комплекс «Квазар-КВО», стандарты времени и частоты.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.12-22>

Введение

Одно из условий получения результатов РСДБ-наблюдений — синхронизация процессов приема, преобразования и регистрации сигналов на радиотелескопах. С целью обеспечения всех систем радиотелескопа опорными высокостабильными сигналами времени и частоты на этапе проектирования комплекса «Квазар-КВО» была разработана система частотно-временной синхронизации (СЧВС).

К концу 90-х годов прошлого века в каждой из трех обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» («Светлое», «Зеленчукская», «Бадары») была создана СЧВС на базе водородных стандартов с нестабильностью частоты не хуже 10^{-15} . Измерение и контроль параметров стандартов выполнялись операторами вручную, требовали больших затрат времени, не позволяли учитывать возникающие изменения параметров аппаратуры и обеспечивать синхронизацию в реальном времени. Контроль синхронизации шкал времени обеспечивался существующими на тот момент перевозимыми квантовыми часами, а также средствами сличений по телевизионным каналам связи и сигналам длинноволновых навигационных систем. Такие средства сличений позволяли

оперативно оценивать расхождение шкал времени обсерваторий с погрешностью несколько микросекунд, но затрудняли поиск корреляционного отклика. Также проводились ежегодные сличения при помощи первозимых квантовых часов, которые позволяли максимально точно измерять относительный ход часов, однако не позволяли контролировать изменения между сличениями.

В 2007 г. была поставлена задача использования РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» для регулярных высокоточных определений параметров вращения Земли (координат полюса, всемирного времени, длительности суток, углов нутации и прецессии) по наблюдениям внегалактических радиоисточников. Но к этому времени аппаратура СЧВС первого поколения выработала свой ресурс: система обеспечивала требуемые характеристики, но большая часть приборов морально и физически устарела. Техническое функционирование СЧВС обеспечивалось за счет большого объема восстановительных и ремонтных работ, а также дублирования основных узлов и устройств. Кроме того, в процессе эксплуатации была выявлена необходимость внедрения методов дистанционного контроля состояния СЧВС и автоматизации процессов измерения характеристик СЧВС для обеспечения режима надежной непрерывной работы.

К 2012 г. завершилась модернизация отдельных частей СЧВС с целью повышения их надежности. Хранители времени и частоты (ХВЧ) были оснащены стандартами VCH-1003M, VCH-1005 и Ч1-80M, позволяющими контролировать параметры при помощи компьютеров [1]. Применение фазовых компараторов VCH-315 с собственной вносимой нестабильностью измеряемых частот $(3-6) \cdot 10^{-16}$ позволило создать высокоточный аппаратно-программный комплекс средств контроля параметров водородных стандартов [2].

В результате проведенной модернизации СЧВС второго поколения появилась возможность дистанционного контроля ее состояния и обеспечения требуемых точностных характеристик в реальном времени.

Создание двухэлементного радиоинтерферометра нового поколения (в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская») потребовало изменения существующей структуры СЧВС. Размещение аппаратуры преобразования сигналов на поворотных частях радиотелескопов привело к необходимости измерения задержки опорных сигналов в кабельных трассах. Для обеспечения требуемых параметров радиоинтерферометра на основе новых технических решений, комплекс устройств, входящих в состав СЧВС третьего поколения, был обновлен, что позволило учесть влияние изменения параметров опорных сигналов на радиотелескопах в реальном времени [3].

Система контроля синхронизации

Обновленная система контроля синхронизации РСДБ-радиотелескопов позволила улучшить характеристики и расширить функциональные возможности СЧВС. Основные задачи, выполняемые системой контроля, следующие: расчет поправок синхронизации шкал времени (ШВ) ХВЧ на основе измерения параметров опорных сигналов; контроль ввода поправок между ШВ, отвечающими за привязку момента регистрации данных наблюдений на радиотелескопах; сличение и ввод поправок относительно ШВ UTC(SU); сличение относительной разности и нестабильности частот ХВЧ комплекса.

Уменьшение инструментальных ошибок радиотелескопов зависит от стабильности опорных частот. На участке трассы от узла измерений ХВЧ до аппаратуры потребителей на радиотелескопе возникает потеря стабильности сигналов из-за механического воздействия на кабели. Это приводит к необходимости получения поправок шкалы времени и частоты, переносимых от ХВЧ до аппаратуры потребителей на радиотелескопе. Обновленная система позволяет измерять вносимые нестабильности опорных сигналов на подвижных частях телескопа со среднеквадратическим относительным случайным двухвыборочным отклонением на интервале усреднения 1 ч не хуже $1 \cdot 10^{-15}$.

Сложность решаемых задач обусловлена значительной удаленностью хранителей. Наиболее эффективный способ контроля — использование центра мониторинга и обработки с каналами связи в реальном времени (рис. 1).

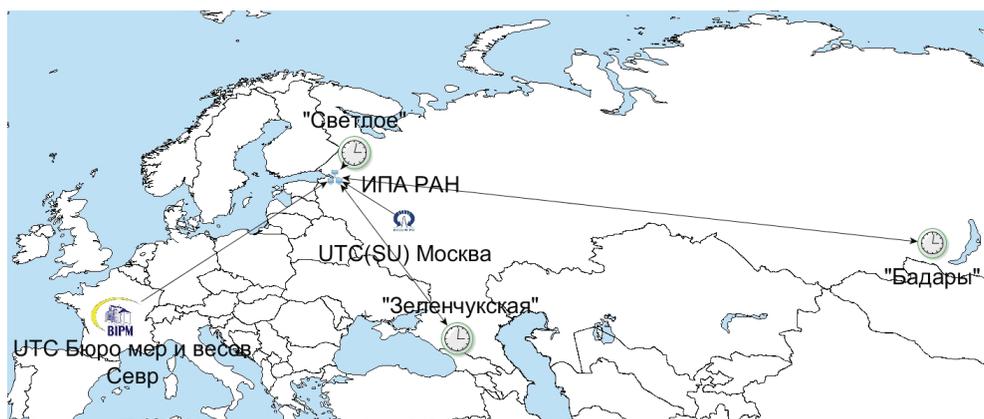


Рис. 1. Расположение объектов сличений центра мониторинга СЧВС

В Санкт-Петербурге выполняется мониторинг параметров аппаратно-программных средств, сбор данных в реальном времени и их хранение на сервере ИПА РАН [4]. Вычисление и контроль введенных поправок в обсерваториях выполняется на основе хранимых данных с оценкой раз в неделю. Недельный интервал позволяет контролировать взаимную разность частот хранителей радиотелескопов на уровне единиц 10^{-14} и получать оценки параметров опорных сигналов с достаточной точностью для каждого сеанса наблюдений.

В обсерваториях данные систематизируются при помощи программы контроля и управления частотно-временной синхронизации (рис. 2), входящей в состав аппаратно-программного комплекса.

Данные от аппаратных средств поступают на компьютер контроля и управления СЧВС, где они форматируются и накапливаются, далее выполняется их первичная оценка и сравнение с допустимыми величинами, устанавливаются фильтры для мультиплексора первичных данных и обеспечивается обмен с локальной сетью. В локальной сети в режиме запроса формируется телеметрический отчет о состоянии данных. В соответствии с наблюдательной программой демультиплексор первичных данных позволяет формировать поток исходных данных в локальную сеть в реальном времени.

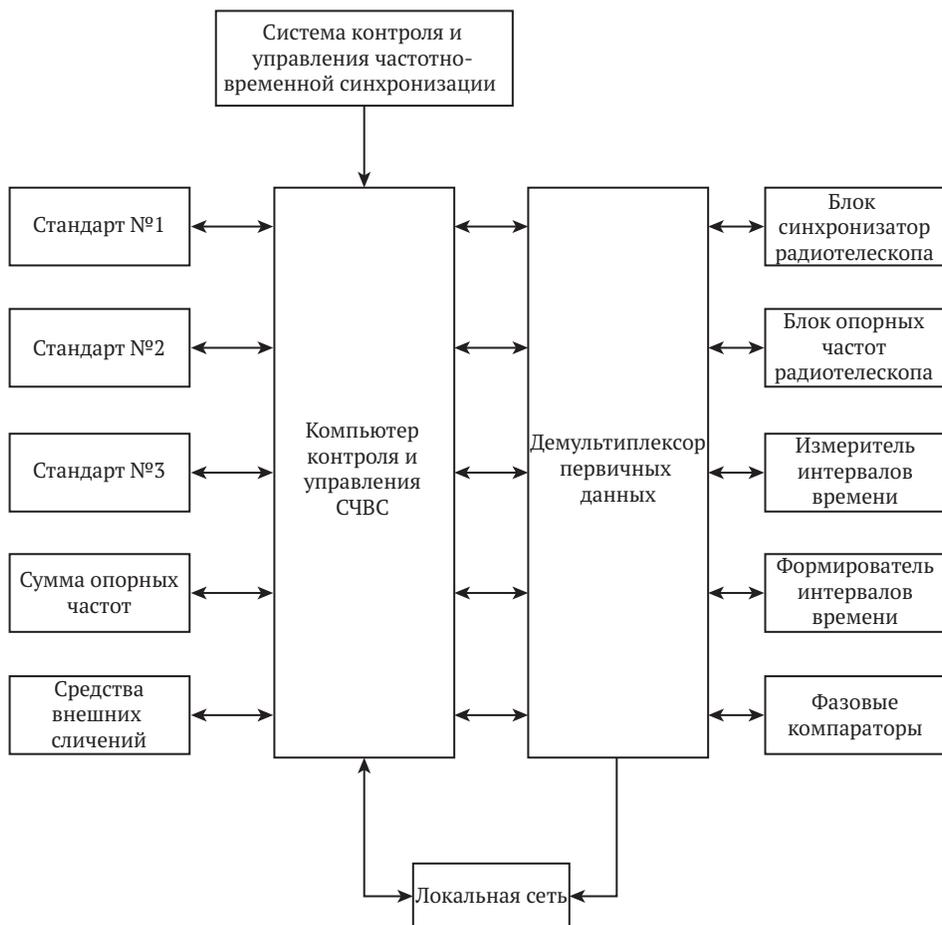


Рис. 2. Структура сбора данных и управления частотно временной синхронизации радиотелескопов в обсерваториях

Применение демultipлексирования при вторичной обработке наблюдений дает возможность передавать для дальнейшего использования не весь массив, а только необходимые данные.

СЧВС с обновленной структурой (см. рис. 3.) позволяет синхронизировать наблюдательные программы в каждой обсерватории на двух и более радиотелескопах, также обеспечивать сигналами синхронизации станцию спутниковой локации, приемные устройства сигналов Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и аппаратные средства в локальной сети.

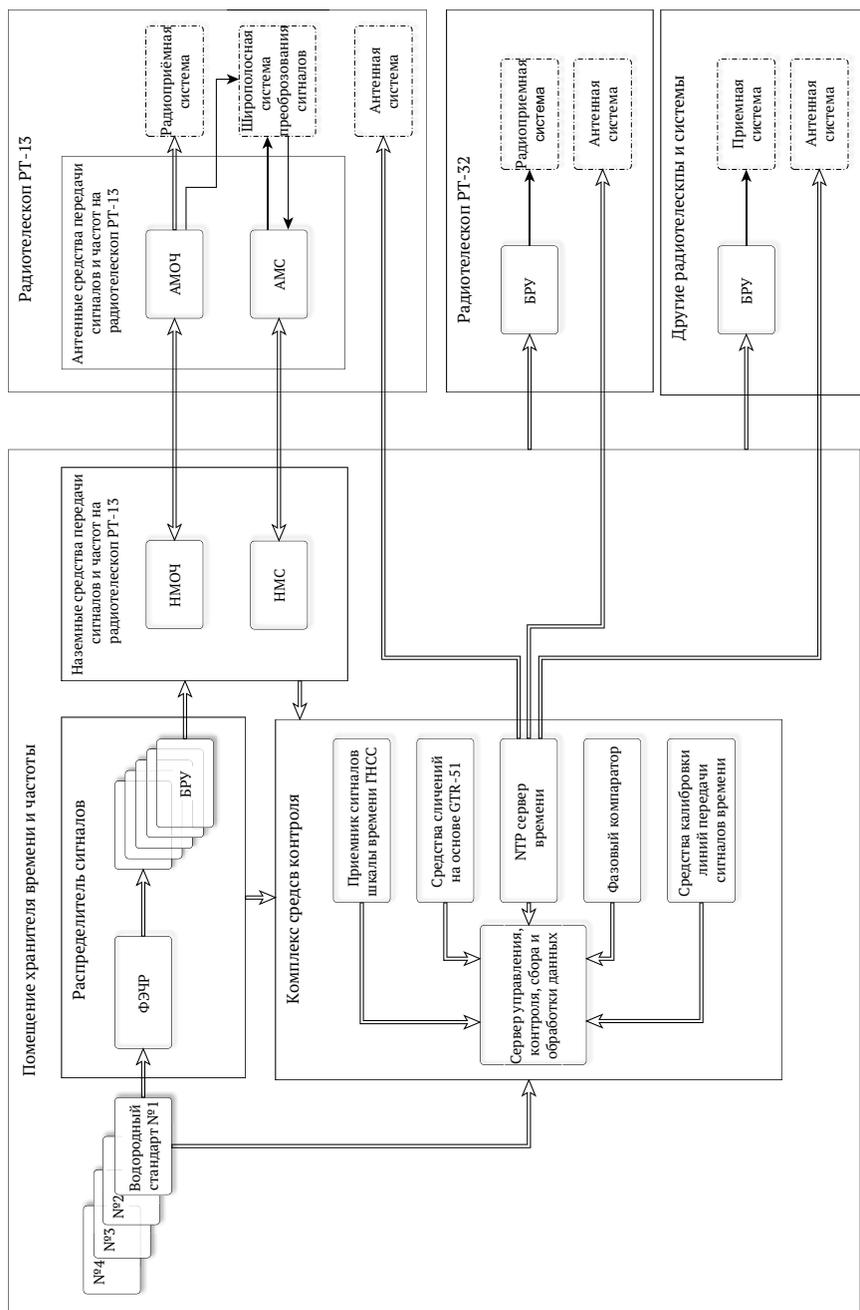


Рис. 3. Структурная схема СЧВС в обсерваториях:
 ФЭЧР – формирователь эталонных частот резервируемого, БРУ – буферный распределительный усилитель; НМОЧ и АМОЧ – наземные и антенные модули блока опорных частот соответственно; НМС АМС – наземные и антенные модули блока синхронизатор соответственно

Аппаратные средства, имеющие собственный интерфейс для обмена данными, подключены к программному комплексу контроля. От группы водородных стандартов, объединенных в рабочие меры, поступает телеметрическая информация о состоянии всех параметров, включающая относительную разность частот. Измерения ХВЧ производятся на выходных разъемах формирователя эталонных частот резервируемого (ФЭЧР). Формирователь измеряет разность частот входных сигналов относительно выходных сигналов 5, 10, 100 МГц и 1 Гц. Для формирователя не имеет значения, какая из вышеперечисленных частот выбрана, так как расчет ведется относительно фазы частоты 5 МГц с соответствующим прореживанием выборок. Значение частот выходных сигналов определяется формулой:

$$f = (1 + \delta + \nu \Delta t) \frac{f_i}{n},$$

где f — средняя частота группы n стандартов или ведущего, в зависимости от режима работы формирователя, i — номер стандарта, δ — начальное значение смещения частоты относительно номинального значения, ν — суточный дрейф со временем Δt от момента начала эпохи, в которой выполняется расчет программируемого дрейфа частоты. Термин «эпоха» означает интервал времени между поправками или сбоем измеряемого сигнала. Секундная метка шкалы времени может быть скорректирована с шагом 1 пс одновременно с группой выходных частот на интервале начала эпохи синхронизации.

В состав комплекса средств контроля входит многоканальный фазовый компаратор, позволяющий контролировать частоты опорных сигналов стандартов между эпохами (рис. 4), а также изменение разности фаз опорных частот на поворотных частях радиотелескопов (рис. 5).

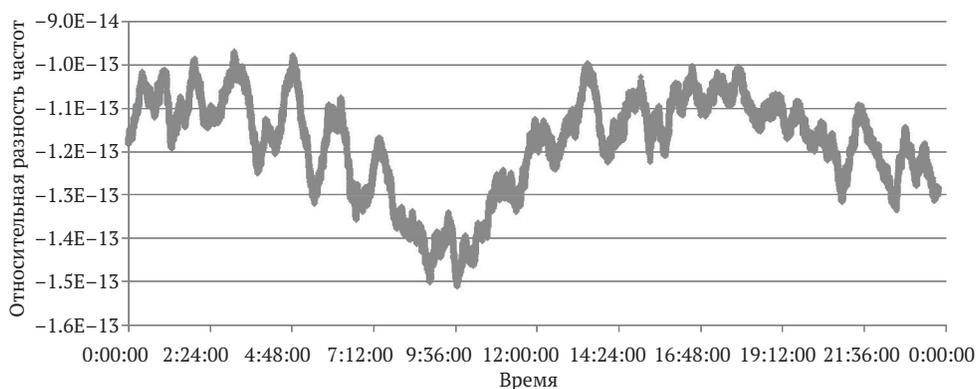


Рис. 4. Контроль относительной разности частот водородных стандартов в обсерватории «Зеленчукская» 31.08.2018

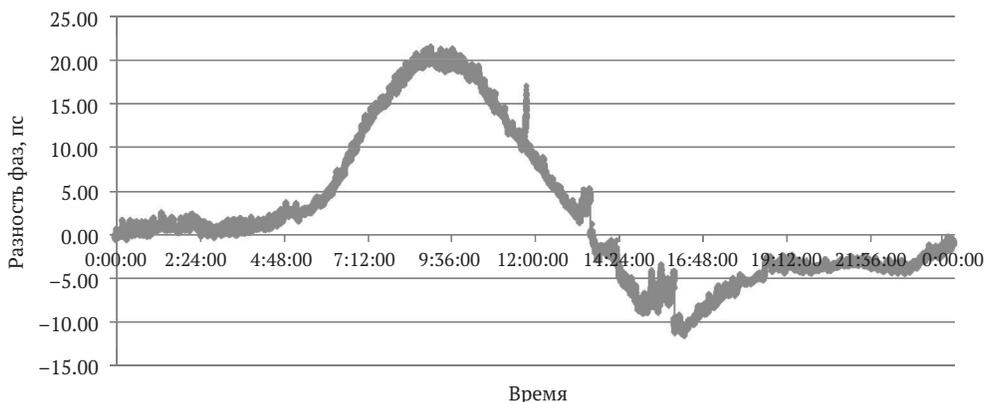


Рис. 5. Контроль фазы опорной частоты 100 МГц в поворотной кабине радиотелескопа РТ-13 относительно узла измерений (31.08.2018)

На рис. 6 а показаны фото наземного и антенного модулей (НМОЧ, АМОЧ) аппаратно-программного комплекса формирования опорных частот, которые с помощью фазового компаратора позволяют контролировать калибровочные задержки фазы на подвижных частях радиотелескопа с погрешностью 1 пс.



а



б

Рис. 6. а — наземные и антенные модули блока опорных частот; б — стойка формирования и распределения опорных сигналов

Компаратор, ФЭЧР и буферные распределительные усилители (БРУ) установлены в стойке формирования и распределения сигналов (см. фото на рис. 6 б). Для обмена данными с сервером применен интерфейс RS-232, создающий минимальные помехи.

Контроль синхронизации шкалы времени между хранителями времени и относительно шкал UTC(SU) обеспечивается с помощью аппаратно-программного комплекса на базе приемного устройства сигналов ГНСС GTR 51.

Размещение антенны на маркерном столбе, привязанном к геодезической сети комплекса «Квазар КВО», позволяет контролировать калибровку внутри объектовых задержек сигналов и выполнять сличения шкал времени двумя методами: дифференциальным и методом позиционирования высокой точности PPP, с погрешностью не хуже 2.5 нс. В отличие от геодезических приемников ГНСС, приемные устройства с временным алгоритмом осуществляют привязку данных к шкале времени радиотелескопов. В процессе работы фор-

мируются файлы в форматах CGGTTS v.2, RINEX v.2.11(3.01). Обработка суточных файлов позволяет получить оценки сличений шкал времени дифференциальным методом: рис. 7.

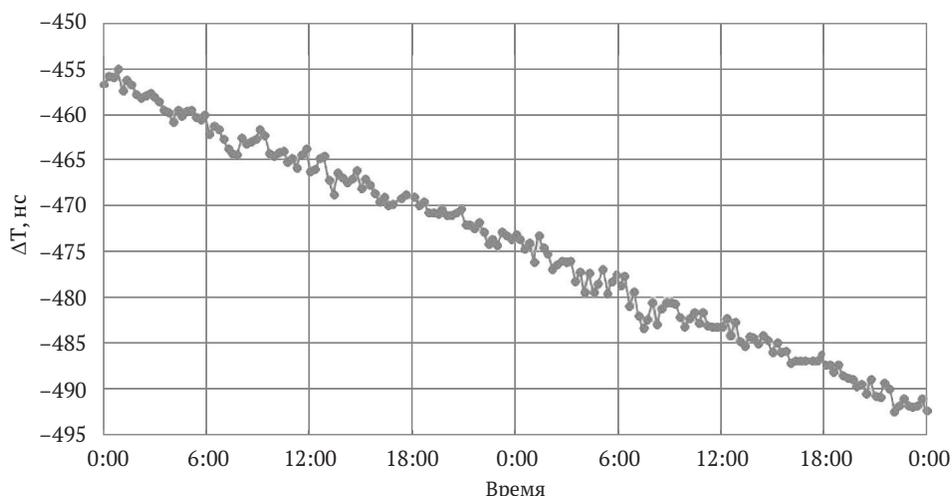


Рис. 7. Сеансные оценки сличений между ШВ хранителей времени обсерватории «Зеленчукская» и «Бадары» ΔT

Калибровка измерительных трасс относительно узла измерений позволяет уменьшить систематическую погрешность синхронизации ШВ. Аппаратно-программный комплекс, состоящий из наземного и антенного модулей синхронизатора, с помощью высокоточного измерителя интервалов времени позволяет контролировать калибровочные задержки передачи сигналов ШВ от ХВЧ. Также измеряются задержки сигналов ШВ GPS и ШВ форматера на подвижных частях радиотелескопа в реальном времени с погрешностью 0.5 нс: (рис. 8–9).



Рис. 8. Антенный и наземный модули синхронизации

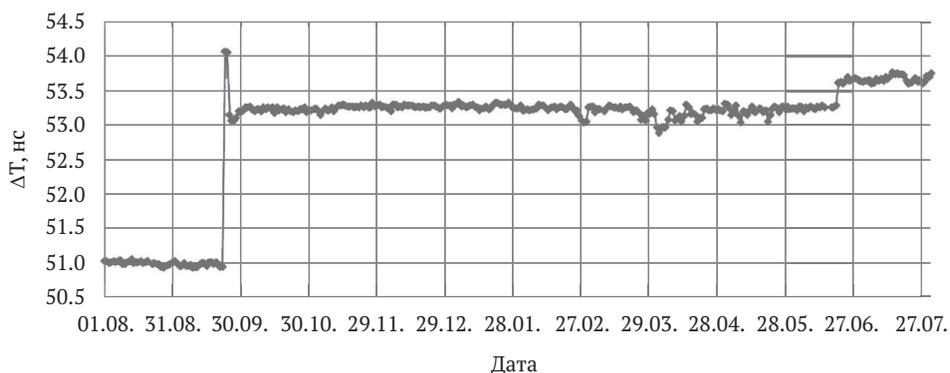


Рис. 9. Контроль синхронизации ШВ форматора широкополосной системы преобразования сигнала в поворотной кабине радиотелескопа РТ-13 обсерватории «Бадары», ΔT — разность шкал времени

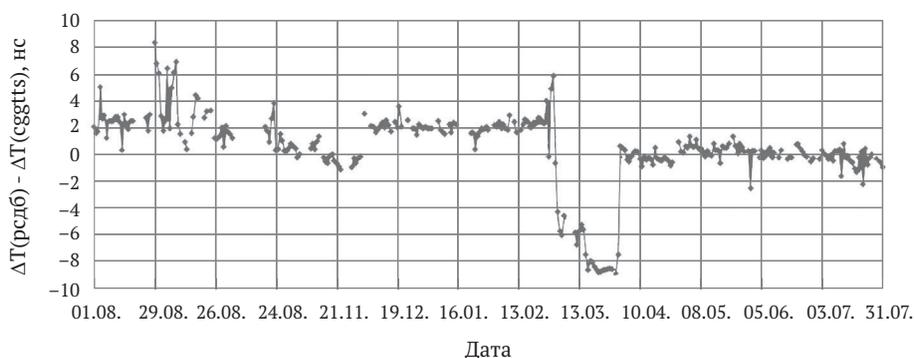


Рис. 10. Разность сличений ШВ хранителя времени и частоты, полученных методом РСДБ и методом обработки CGGTS-файлов

Измерение задержки синхронизации ШВ форматора и калиброванных задержек позволяет осуществлять сличение ШВ обсерваторий методом РСДБ.

Сравнение результатов сличений различными способами позволяет обнаружить неоднозначность, возникающую при расчете поправок: рис. 10.

Устранить неоднозначность возможно относительно дополнительной более точной шкалы времени средствами сличений, имеющими меньшую погрешность. Расчет относительно групповой шкалы времени комплекса «Квazar КВО» позволит уменьшить погрешность синхронизации существующими средствами сличений.

Заключение

Создана система высокоточного контроля синхронизации ШВ РСДБ-комплекса, способная обеспечить сигналами синхронизации группы радиотелескопов в каждой обсерватории. Дальнейшая модернизация радиотелескопов РТ-32 позволит в реальном времени контролировать опорные сигналы

на подвижных частях радиотелескопа. Для уменьшения погрешности синхронизации радиотелескопов комплекса «Квазар КВО» целесообразно вести расчет групповой частоты и шкалы времени. Использование результатов точных сличений частот и шкал времени хранителей при обработке РСДБ-данных позволит уменьшить инструментальную ошибку радиотелескопов. Уменьшение кратковременной нестабильности опорных частот позволит снизить собственную погрешность системы контроля при уменьшении времени усреднения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Л и т е р а т у р а

1. *Вытнов А. В., Иванов Д. В.* Модернизация хранителей времени и частоты РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2009. — Вып. 20. — С. 393–395.

2. *Вытнов А. В., Иванов Д. В., Жуков Е. Т., Смоленцев С. Г., Яковлев В. А.* Система частотно-временной синхронизации комплекса «Квазар-КВО». 25 лет Институту прикладной астрономии Российской академии наук // История науки и техники.— М.: Научтехлитиздат, 2013. — № 3. — С.70–76.

3. *Иванов Д. В., Вытнов А. В., Карпичев А. С., Зиновьев П. В., Царук А. А.* Синхронизация сигналов частоты и времени РСДБ-системы нового поколения / Материалы VIII-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». — ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — Т. 183, №7. — С. 232–235.

4. *Вытнов А. В., Иванов Д. В.* Мониторинг параметров стандартов времени и частоты радиоинтерферометрического комплекса с использованием устройств кодирования // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2010. — Вып. 21. — С. 48–51.

The Synchronization Control System of “Quasar” VLBI network

A. V. Vytnov, D. V. Ivanov, A. A. Makhnach,
A. S. Karpichev, A. A. Tsaruk

One of the conditions for successful VLBI observations is the high-precision synchronization of radio telescopes equipment. The use of special hardware and software allows us to carry out high-precision comparisons of the reference frequencies and time signals necessary for the operation of the VLBI network. The source of these signals is the time and frequency standards. The control system of frequency and time synchronization allows to maintain the parameters of the reference signals of the time and frequency standards. One of the tasks of the system is to minimize the loss of synchronization that occurs when signals are transmitted to a consumer on a radio telescope.

The article presents the structure of the radio telescope synchronization control system, describes how to collect data and control the time and frequency standards in real time. The results of comparisons and monitoring of the signals of the reference frequency and time scales are presented.

Keywords: VLBI, comparison of time scales, synchronization, "Quasar" VLBI network, time and frequency standards.