

## Калибровка тракта передачи шкал времени радиотелескопа для реализации РСДБ-сличений

© А. А. Царук<sup>1</sup>, А. С. Карпичев<sup>1</sup>, А. В. Вытнов<sup>1</sup>,  
А. Л. Чиж<sup>2</sup>, К. Б. Микитчук<sup>2</sup>, С. А. Малышев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
г. Минск, Беларусь

В работе представлена схема передачи эталонных сигналов времени и частоты, а также методика калибровки задержки в тракте передачи шкал времени (ШВ) при проведении сравнения ШВ и частот удаленных водородных стандартов обсерваторий радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» методом РСДБ.

Выполнена оценка неисключенной систематической погрешности, составившей менее 0.5 нс при сравнении стандартов частоты и времени обсерваторий комплекса «Бадары» и «Зеленчукская» методом РСДБ. Предложен метод калибровки тракта передачи ШВ путем передачи радиочастотных сигналов по волоконно-оптическим линиям на различных длинах волн. Внедрение предложенного метода позволит более чем на порядок уменьшить неисключенную систематическую погрешность при сравнении ШВ методом РСДБ.

**Ключевые слова:** РСДБ, сличение шкал времени, оптическое волокно, лазерная техника.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.48.92-99>

Технические решения по построению двухэлементного радиоинтерферометра нового поколения на базе обсерваторий «Зеленчукская» и «Бадары» комплекса «Квазар-КВО» [1] позволяют определять расхождения ШВ и частот удаленных водородных стандартов обсерваторий. Важным аспектом сравнения ШВ методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) является прецизионная калибровка тракта передачи опорных сигналов на радиотелескоп, поскольку привязка результатов РСДБ-наблюдений проводится к точке пересечения азимутальной и угломестной осей радиотелескопа, а сравниваемые стандарты времени и частоты располагаются в специализированном помещении, расположенном на расстоянии сотен метров от радиотелескопа.

Разность ШВ стандарта частоты и ШВ РСДБ определяется соотношением:

$$\Delta T_{\text{обсерватории}} = \delta_s + t_{\text{каб}} + t_{\text{ШСПС}}$$

где  $\delta_s$  — задержка между выходом широкополосной системы преобразования сигналов (ШСПС) [2], возвращающим секунду привязки РСДБ-наблюдений (1 Гц форматтер), и точкой пересечения азимутальной и угломестной осей радиотелескопа. Поскольку конфигурация оборудования радиотелескопов РТ-13 комплекса «Квазар-КВО» однотипна, данный параметр можно считать одинаковым при расчете разности ШВ между обсерваториями.  $t_{\text{каб}}$  — постоян-



Распределительный усилитель 1 pps позволяет передать сигнал 1 Гц ШВ на ГНСС-приемник для сличения ШВ обсерватории с UTC(SU), на радиотелескоп РТ-13 для синхронизации РСДБ-наблюдений и на измеритель временных интервалов для определения внутренних задержек при передаче эталонных сигналов. Сигнал 1 Гц ШВ 2 формируется в антенной части синхронизатора из сигнала опорной частоты 100 МГц и привязывается к фронту сигнала 1 Гц ШВ, получаемого по длинному радиочастотному кабелю из помещения хранителя времени и частоты. Синхронизация РСДБ-наблюдений производится по сигналу 1 Гц форматтера, формируемого в ШСПС из сигнала опорной частоты 100 МГц с привязкой к фронту сигнала 1 Гц ШВ2, получаемого с антенной части синхронизатора.

После калибровки задержек в кабелях и устройствах, обеспечивающих передачу сигнала для синхронизации аппаратуры радиотелескопов РТ-13 в обсерваториях, расхождение ШВ стандартов частоты и времени обсерваторий «Бадары» и «Зеленчукская», можно записать следующим образом:

$$\Delta T_{\text{ШВ}} = \Delta T_{\text{РСДБ}} - 238.2 \text{ нс} + t_{\text{ШСПС\_Бадары}} - t_{\text{ШСПС\_Зеленчукская}}$$

где  $\Delta T_{\text{РСДБ}}$  — расхождение ШВ, получаемое по результатам обработки РСДБ-наблюдений,  $t_{\text{шспс}}$  — разность фаз сигналов 1 Гц ШСПС и 1 Гц ШВ, получаемая на измерителе временных интервалов в помещении хранителя времени и частоты каждой обсерватории. Измерение  $t_{\text{шспс}}$  позволяет проводить постоянный контроль задержек в тракте передачи ШВ на радиотелескоп. Результаты этих измерений приведены на рис. 2–3.

Изменение этих задержек вносит основной вклад в погрешность калибровки тракта передачи ШВ при РСДБ-сличениях, в которой также учтена неопределенность калибровки измерителя интервалов времени. Неисключенная систематическая погрешность передачи ШВ при РСДБ-сличениях может быть оценена следующим образом:

$$U_B = \sqrt{U_{B\_Бадары}^2 + U_{B\_Зеленчукская}^2 + U_{B\_53230}^2}$$

где  $U_{B\_Бадары}$ ,  $U_{B\_Зеленчукская}$  — неопределенность при оценке разности фаз сигналов 1 Гц ШСПС и 1 Гц ШВ, включающая в себя погрешность формирования сигналов в ШСПС и магистральных кабелях в обеих обсерваториях,  $U_{B\_53230}$  — неопределенность калибровки измерителя интервалов времени Agilent 53230A, равная 12 пс. По результатам калибровки тракта формирования сигнала привязки РСДБ-наблюдений, непрерывно выполняемой при сличений ШВ удаленных стандартов времени обсерваторий, можно заключить, что неисключенная систематическая погрешность  $U_B$  не превышает 0.5 нс.

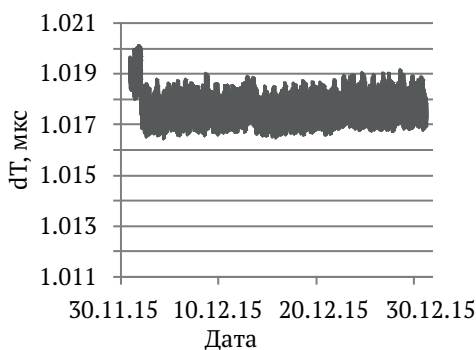


Рис. 2. Контроль задержек в тракте передачи ШВ на радиотелескоп «Бадары»

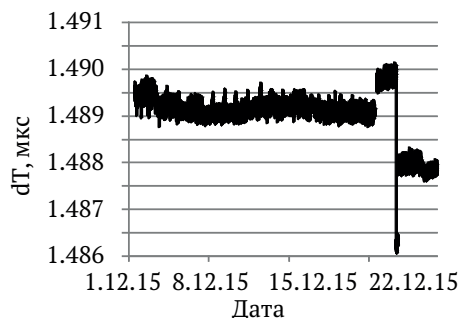


Рис. 3. Контроль задержек в тракте передачи ШВ на радиотелескоп «Зеленчукская»

Повысить точность калибровки тракта передачи сигналов ШВ на радиотелескоп, а значит, уменьшить неисключенную систематическую погрешность передачи ШВ, можно путем непрерывного измерения длин линий передачи, что возможно реализовать с помощью передачи модулированных по интенсивности оптических сигналов по волоконно-оптическим кабелям. Для увеличения точности передачи сигналов ШВ возможно использование подхода, приведенного в работе [3], однако измерение длительности задержки в линии передачи, и, как следствие, абсолютная калибровка длительностей задержки в элементах тракта передачи возможны при использовании двунаправленной волоконно-оптической линии передачи с мультиплексированием по длинам волн. Проведенный анализ рынка оптических компонентов показал, что для передачи аналоговых сигналов частотой от 1 Гц возможно применение волоконно-оптической линии ВОЛП-01 (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» [4]), используемой для передачи синхроимпульсов длительностью от 1 нс до 20 мкс. Линия состоит из лазерного модуля ЛД-01 и фотодиодного модуля МФ-01 с оптоволоконными выводами, соединенными оптической розеткой FC/APC (рис. 4). Лазерный и фотодиодный модули имеют габариты 22 x 20 x 19 мм (SMA разъем не включен в эти размеры). Основные параметры ВОЛП-01 приведены в таблице.



Рис. 4. Фото волоконно-оптической линии ВОЛП-01

Основные параметры ВОЛП-01

Параметр	Значение
Длительность передаваемых синхроимпульсов	от 1 нс до 100 мкс
Амплитуда передаваемых синхроимпульсов	от 1 до 5 В
Коэффициент передачи:	от -20 до +6 дБ (в зависимости от сопротивления нагрузки фотодиода от 50 Ом до 1 кОм)
Время нарастания (по уровням 0.1–0.9)	от 50 пс до 10 нс (в зависимости от сопротивления нагрузки фотодиода от 50 Ом до 1 кОм)
Кратковременный джиттер	< 1 пс

Мультиплексирование по длине волны осуществляется при использовании лазерных модулей ЛД-01 с длинами волн 1310 и 1330 нм, а также соответствующих волоконно-оптических мультиплексоров по длинам волн 1310/1330 нм. Следует отметить, что разность скоростей распространения сигнала в волоконно-оптическом кабеле на длинах волн вблизи минимума хроматической дисперсии оптического волокна незначительна, а значит и время распространения сигналов на длинах волн 1310/1330 нм в линии будет различаться менее чем на 1 пс. По этой причине при двунаправленной передаче сигнала 1 Гц ШВ возможен учет величины задержки в длинной линии передач, аналогично методу, используемому при передаче опорной частоты [3]. На основе данных о величине задержки производится сравнение выходного сигнала 1 Гц форматтера (метки времени, к которой привязываются РСДБ-наблюдения) и входного сигнала 1 Гц ШВ. Схема передачи сигнала метки времени на радиотелескоп приведена на рис. 5.

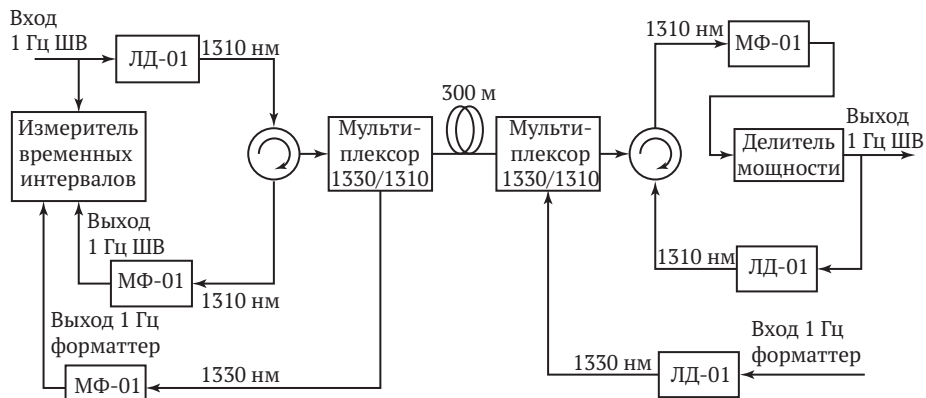


Рис. 5. Схема передачи сигнала метки времени на радиотелескоп

Для проверки предложенного метода трансляции ШВ на радиотелескоп с калибровкой тракта проведен эксперимент по передаче синхросигнала 1 pps по волоконно-оптической линии ВОЛП-01. Синхросигнал от стандарта частоты и времени Ч1-1007 подавался на вход лазерного модуля ЛД-01. Задержка модулированного по интенсивности оптического сигнала осуществлялась с помощью волоконно-оптической катушки длиной 300 м. Преобразование оптического сигнала в электрический осуществлялось с помощью фотодиодного модуля МФ-01, оптоволоконный вывод которого соединен с выходом волоконно-оптической катушки. Сигнал с выхода волоконно-оптической линии подавался на первый вход измерителя временных интервалов. На второй вход измерителя временных интервалов был подан сигнал 1 pps от стандарта.

Для исследования возможности отслеживания изменений задержки сигнала 1 pps в волоконно-оптической линии при внешних воздействиях (например, поворот антенны и температурные изменения) проводились измерения абсолютной величины длительности задержки при нагреве волоконно-оптической катушки, а также оценка неопределенности длительности временных интервалов между синхроимпульсами с выхода волоконно-оптической линии и стандарта (на основе среднеквадратичного отклонения). На рис. 6 приведена длительность задержки в волоконно-оптической линии передачи сигнала, измеренная при нагреве волоконно-оптической катушки. Видно, что при изменении температуры волоконно-оптической катушки увеличивается длительность задержки в волоконно-оптической линии в соответствии с коэффициентом температурного расширения стандартного 250 мкм волокна равным 37 пс/(°С·км).

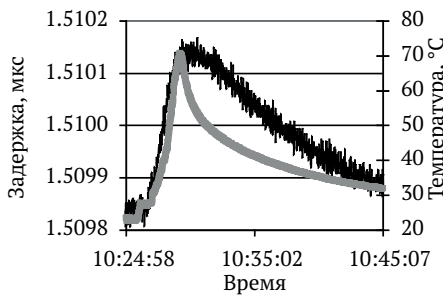


Рис. 6. Изменения задержки в волоконно-оптической линии при нагреве волоконно-оптической катушки

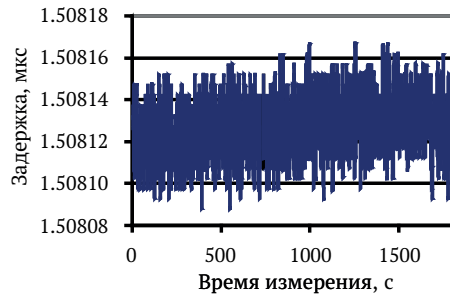


Рис. 7. Изменения задержки при передаче сигнала 1 pps по волоконно-оптической линии длиной 300 м

Среднеквадратическое отклонение временного интервала при передаче 1 pps по волоконно-оптической линии длиной 300 м составило 14 пс, при этом среднеквадратическое отклонение временного интервала при подключении сигнала 1 pps стандарта частоты и времени на оба входа измерителя временных интервалов составляет 13 пс (рис. 7). Таким образом, после внедрения данного способа передачи ШВ суммарная неисключенная систематическая погрешность составит порядка 50 пс при калибровке трактов передачи ШВ двух обсерваторий.

## Заключение

Приведен метод калибровки тракта передачи опорных сигналов ШВ на радиотелескоп и выполнена оценка неисключенной систематической погрешности передачи сигналов ШВ при РСДБ-сличениях. Предложен независимый метод передачи сигналов метки времени по оптоволокну, позволяющий проводить калибровку тракта без влияния погрешностей, возникающих в длинных радиочастотных кабелях и устройствах преобразования сигнала ШВ. Внедрение данного метода позволит на порядок уменьшить неисключенную систематическую погрешность при сравнении ШВ методом РСДБ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» и ЦКП «Супер-компьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

## Литература

1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilyin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshkin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook // *Geodesy and Geodynamics*. — 2019. — Vol. 10, no. 2. — P. 150–156.
2. Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В. Система преобразования сигналов S/X диапазона волн для радиоинтерферометра оперативного мониторинга Всемирного времени // *Приборы и техника эксперимента*. — М.: Наука, 2013. — № 3. — С. 101.
3. ГОСТ Р 8.736-201. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 23 с.
4. Царук А. А., Карпичев А. С., Зиновьев П. В., Витнов А. В., Иванов Д. В. Передача сигнала опорной частоты на РСДБ-радиотелескоп по оптоволоконной линии // *Труды ИПА РАН*. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 43. — С. 143–150.
5. Чиж А. Л., Малышев С. А., Микитчук К. Б. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофотоники на их основе // *IV Всероссийская конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*, Санкт-Петербург: сборник докладов. — 2015.

## Calibration of the Radio Telescope's Time Scale Path to Provide Clock Synchronization Using VLBI

A. Tsaruk, A. Karpichev, A. Vytnov,  
K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev

The paper presents a technique to calibrate the delay in the transmission path of time scales when the remote hydrogen standards of the Quasar network are being synchronized using the VLBI. VLBI experiments with the participation of Badary and Zelenchukskaya observatories show a smaller than 0.5 ns figure of the non-excluded systematic synchronization error. Also, we propose a method to calibrate the time scale path using radio frequency signals with different wavelengths which

are transferred via fiber optic lines. The proposed method will allow for a decrease of more than one order of magnitude in the non-excluded systematic error when comparing the time scales using VLBI.

**Key words:** VLBI, comparison of time scales, optical fiber, laser technology.