

11. **Bernese GPS Software.** Version 5.0 / Ed. R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez e. a. // Astronomical Institute of Bern University, 2007.

12. **Ипатов А. В. и др.** Ежедневные оперативные определения Всемирного времени по наблюдениям РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» // Тр. ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 237—242. ISBN 978-5-93197-029-5.

13. **Boehm J. e. a.** Plans for the Vienna VLBI Software VieVS // Proc. 19th Europ. VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting. 24—25 March 2009, Bordeaux, edited by G. Bourda, P. Charlot and A. Collioud, 2009.

14. **Кауфман М. Б., Пасынок С. Л.** Оперативные вычисления параметров вращения Земли по данным РСДБ с помощью программы VieVS // Тр. ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 361—363. ISBN 978-5-02-038188-9.

15. **Белоцерковский Д. Ю.** О вычислении эталонного времени в средние моменты передач радиосигналов // Труды институтов комитета стандартов. 1962. Вып. 58 (118).

16. **Кауфман М. Б.** «Вероятностно-статистический» метод вычисления всемирного времени из обработки астрономических наблюдений служб времени // Исследования в области измерений времени и частоты: Труды ВНИИФТРИ. 1976. Вып. 29 (59).

17. **Кауфман М. Б.** Методика вычислений параметров вращения Земли в ГСВЧ СССР // Измерительная техника. 1989. № 4. С. 38—39; **Kaufman M. B.** Procedure employed in SSTF USSR for calculating the earth's rotational parameters // Measurement Techniques. 1989. V. 32. N. 4. P. 348—350.

18. **Кауфман М. Б.** Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений // Точные измерения для высоких технологий. Монография под общей редакцией П. А. Красовского. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008. С. 80—118.

19. **Сервер ВНИИФТРИ.** [Электрон. ресурс]. ftp://ftp.vniiftri.ru/Out_data/ (дата обращения 11.09.2014 г.)

Дата принятия 10.11.2014 г.

006.924.4

Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени

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

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: nio8@vniiftri.ru

Предложен способ одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удаленных наземных объектов с использованием оптоволоконной линии связи. Оптический импульс с одного из объектов направляется в оптоволоконную линию, в шкале времени излучающего объекта определяются моменты времени излучения этого импульса и приема импульса, отраженного от конца оптоволоконной линии на втором объекте. На основании полученных данных определяется расхождение шкал времени объектов. Рассмотрена схема системы, реализующей указанный способ и позволяющей синхронизировать шкалы времени с погрешностью не более 100 пс.

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

The method for comparison and synchronization of time scales of distant terrestrial objects by means of unilateral and bilateral comparisons using a fiber-optic communication line is suggested. An optical pulse from one of objects is directed in fiber-optic line. In the time scale of this object the moments of pulse emission and of receiving the pulse reflected from the end of an optical fiber on the second object are determined. On the basis of this data the divergence of time scales is determined. A scheme system with an error less than 100 ps based on this method is proposed.

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

Развитие глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, в первую очередь повышение ее точностных характеристик, невозможно без усовершенствования средств метрологического обеспечения. Одна из важных задач — обеспечение прослеживаемости средств измерений (СИ) системы, т. е. установление и документальное подтверждение их связи с государственными первичными эталонами физических величин посредством поверок и сличений.

В целях развития СИ ГЛОНАСС и достижения заданных технических характеристик системы во ВНИИФТРИ проводятся работы по созданию стационарного комплекса метрологического обеспечения (СКМО) средств оценки характеристик беззапросных и запросных измерительных радио-

технических средств наземного комплекса управления (НКУ), основу которого составляют СИ параметров навигационных сигналов ГЛОНАСС, антенно-фидерных устройств, а также средства воспроизведения навигационных сигналов и средства формирования шкалы времени. Данный комплекс предназначен для оценки точностных характеристик СИ ГЛОНАСС при проведении автономных и комплексных испытаний, испытаний в целях утверждения типа, первичной и периодической поверки.

Требованиями к СКМО НКУ предусмотрено обеспечение синхронизации шкал времени (ШВ) удаленных объектов в режиме реального времени с инструментальной погрешностью не более 100 пс. Один из объектов — аппаратно-программный комплекс формирования шкалы времени (АПК ФШВ)

Государственного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1—2012 [1], а другой — аппаратура СКМО НКУ. Существующие методы сравнения ШВ, такие как TWSTFT (two-way satellite time and frequency transfer) или перевозимые квантовые часы, имеют погрешность более 0,5 нс [2]. Поэтому для достижения заданных характеристик синхронизации ШВ между этими объектами предложено использовать волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС). В ряде работ, например [3], показано, что на сегодняшний день применение ВОЛС обеспечивает наилучшую точность синхронизации.

Наиболее распространенными являются системы двухпутевой передачи времени с применением телекоммуникационных протоколов SONET (SDH). В таких системах используют кадры протокола для передачи метки времени и его значения от удаленных часов. Суть метода, основанного на передаче времени туда и обратно, состоит в сравнении времени двух пространственно-разнесенных часов, связанных каналом ВОЛС. Часы на каждом конце линии передают местное время и принимают время удаленных часов. В этом случае на каждом из пунктов измеряется разность времени. Если разности отличаются, то с помощью подстройки часов результат путевой задержки устраняется в предположении, что путь сигналов туда и обратно одинаков [4].

Также известен метод сравнения ШВ с применением оптического шлейфа, но, по оценкам авторов, только случайная погрешность этого метода составляет 90 пс при условии абсолютного равенства длин используемых волокон [5, 6].

Оба метода основаны на вычислении времени задержки оптических сигналов в оптоволокне и требуют нескольких, соответственно двух или трех оптических волокон, проложенных совместно между пунктами, в которых сравнивают и синхронизируют ШВ. При этом для достижения погрешности синхронизации не более десятков пикосекунд необходимо обеспечить равенство длин волокон с погрешностью не более 1 см. Однако под влиянием физических факторов в процессе эксплуатации ВОЛС, в том числе суточных и сезонных

колебаний температуры, время задержки сигналов в разных волокнах может изменяться по-разному, что приводит к неконтролируемому увеличению погрешности синхронизации ШВ.

Равенства длин нескольких оптических волокон можно достичь только с помощью оптических кабелей, специально прокладываемых для синхронизации ШВ, что не позволяет использовать арендованные у операторов связи волокна, длину которых невозможно определить точно (так называемые темные волокна). Для проведения необходимых коммутаций и контроля состояния оборудования при синхронизации удаленных ШВ необходим доступ ко всем узлам ВОЛС и установленному в них оборудованию. В узлах связи операторов могут происходить неконтролируемые потребителем изменения, например, при переходе на резервное оборудование, что может привести к скачкообразному изменению временных задержек сигналов в ВОЛС и фактическому сбою в работе систем синхронизации ШВ.

Недостатки рассмотренных методов ограничивают точность систем, что приводит к необходимости разработки системы синхронизации ШВ, использующей только одно оптическое волокно и учитывающей задержку в этом волокне в текущий момент времени.

Для обеспечения требуемой точности синхронизации ШВ удаленных объектов предложена система одно- и двухсторонних сравнений и синхронизации (СОДС) ШВ, схема которой показана на рис. 1. Аппаратно-программный комплекс формирования шкалы времени АПК ФШВ формирует ШВ п. А в виде физических сигналов 1 PPS (секундные метки времени), синхронизированных с национальной шкалой времени UTC(SU). В качестве формирователя ШВ п. В — СКМО НКУ, используют промежуточный генератор ПГ, на вход которого поступает сигнал опорной частоты 5 МГц с водородного стандарта частоты, и усилитель-распределитель УР, с выхода которого сигналы 1 PPS поступают на другие элементы. Элементы СОДС соединены ВОЛС, проложенной между объектами.

В качестве промежуточного генератора могут быть использованы вспомогательный выходной генератор АОГ-110

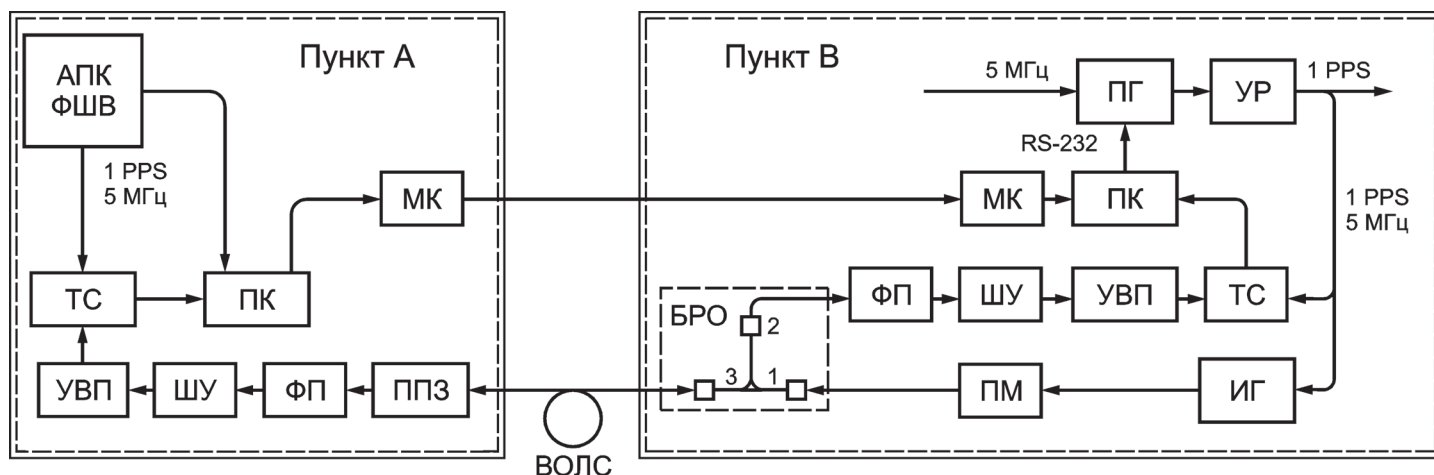


Рис. 1. Функциональная схема системы сравнения и синхронизации шкал времени:

АПК ФШВ — аппаратно-программный комплекс формирования шкалы времени; ТС — таймеры событий; УВП — устройства временной привязки; ПК — персональные компьютеры; МК — медиаконверторы; ШУ — широкополосные усилители; ФП — фотоприемные модули; ППЗ — полупрозрачное зеркало; ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи; БРО — блок оптоволоконных разветвителей-объединителей; ПГ, ИГ — промежуточный и импульсный генераторы, соответственно; ПМ — передающий лазерный модуль; УР — усилитель-распределитель

фирмы Symmetricom или импульсный генератор HROG-5 фирмы Spectradynamics, Inc. Указанные генераторы являются основными исполнительными устройствами ФШВ и предназначены для прецизионного ввода отстроек по частоте и фазе в опорный сигнал 5 МГц. Данные приборы имеют выходы синусоидальных и импульсных сигналов 1 PPS и могут работать в составе автоматизированных комплексов. Управляют генераторами с помощью интерфейсов RS-232.

Принцип действия СОДС ШВ состоит в следующем. Секундный импульс с промежуточного генератора через усилитель-распределитель поступает на импульсный генератор ИГ и таймер событий ТС п. В. Импульсный генератор формирует последовательность импульсов (метки времени), которые преобразуются лазерным передающим модулем ПМ в оптические импульсы. Каждый i -й оптический импульс проходит через разветвитель 1 в блоке разветвителей-объединителей БРО, затем импульс небольшой мощности через объединитель 2 поступает в фотоприемный модуль ФП п. В, а основной импульс через разветвитель 3 — в ВОЛС. Электрический сигнал с фотоприемного модуля через широкополосный усилитель ШУ и устройство временной привязки УВП проходит в таймер событий, что обеспечивает фиксацию метки времени T_i^{B1} в ШВ п. В.

Оптический импульс, пришедший по ВОЛС в п. А с некоторой временной задержкой τ_3 , через полупрозрачное зеркало ППЗ попадает в фотоприемный модуль, который преобразует его в электрический сигнал, поступающий в таймер событий. Также в таймер событий подается сигнал 1 PPS с АПК ФШВ, что позволяет определить время прихода i -го оптического импульса T_i^A в ШВ п. А. Оптический импульс секундной метки, пришедший в п. А, отражается от полупрозрачного зеркала и проходит по линии связи обратный путь. С временной задержкой, строго равной задержке τ_3 в линии при прямом прохождении, отраженный импульс через разветвитель 3 и объединитель 2 поступает на вход фотоприемного модуля п. В, сигнал с которого через широкополосный усилитель и устройство временной привязки поступает в таймер событий, что позволяет зафиксировать время прихода i -го отраженного импульса T_i^{B2} в ШВ п. В.

Информация о расположении меток времени T_i^{B1}, T_i^{B2} с таймера событий п. В поступает в компьютер ПК для последующей обработки. Также в компьютер по независимой ли-

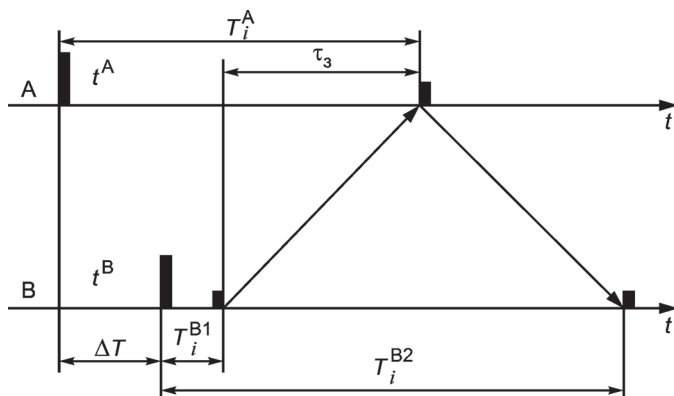


Рис. 2. Временная диаграмма работы системы одно- и двухсторонних сравнений и синхронизации шкал времени

нии связи — выделенной оптоволоконной линии — через медиаконверторы МК Fast Ethernet, поступает информация с таймера событий п. А о положении пришедшей в него метки времени T_i^A .

Временная диаграмма, поясняющая процесс сравнения ШВ, показана на рис. 2, где А, В — шкалы первого и второго объектов, соответственно, t^A, t^B — секундные метки 1 PPS ШВ соответствующих пунктов. Калибруемые задержки в оптико-электронных и электронных устройствах не показаны.

Цикл измерений составляет несколько секунд. В итоге после каждого цикла в компьютере п. В формируется информация о расхождении ΔT ШВ пунктов, которое определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(T_i^A - \frac{T_i^{B1} + T_i^{B2}}{2} \right) + \frac{\tau_{12} - \tau_{13} + \tau_{32}}{2},$$

где n — количество оптических импульсов в одном цикле измерений; $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{32}$ — задержки прохождения оптического сигнала в плечах блока оптоволоконных разветвителей между разъемами 1 и 2, 1 и 3, 3 и 2, соответственно.

На основании вычисленного расхождения ΔT с компьютера п. В по интерфейсу RS-232 передается корректирующий сигнал на промежуточный генератор, в котором путем регулировки фазы выходного сигнала осуществляется синхронизация ШВ пунктов.

Точностные характеристики СОДС ШВ определяются характеристиками входящих в ее состав устройств, передающих и принимающих метки времени.

Погрешность определения моментов излучения и приема лазерных импульсов в ШВ п. В, а также погрешность определения моментов приема лазерных импульсов в ШВ п. А содержит случайную и систематическую составляющие. Случайная погрешность однократного измерения обусловлена погрешностями фотоприемных модулей, широкополосных усилителей, формирования измерительного сигнала в устройстве временной привязки, таймера событий. Погрешность существующих серийно выпускаемых таймеров событий может составлять единицы пикосекунд, погрешность остальных устройств не превышает 30 пс при полосе пропускания элементов системы 10 ГГц. Таким образом, при указанной полосе пропускания суммарная средняя квадратическая погрешность определения моментов излучения и приема единичного прямого и отраженного лазерных импульсов в соответствующих ШВ не превышает 50—70 пс. Отметим, что конструкция аппаратуры обеспечивает возможность проведения до нескольких тысяч сличений в течение секундного цикла, что позволяет значительно уменьшить случайную погрешность.

Систематическая погрешность СОДС ШВ обусловлена неточностью определения задержек в ее составных частях (оптоволоконных элементах, кабелях связи, электронных устройствах). При использовании современных СИ, в том числе входящих в состав созданного во ВНИИФТРИ комплекса аппаратуры контроля спектральных, энергетических и временных характеристик оптического излучения, структуры цифровых сигналов [7], указанные задержки можно измерить с погрешностью 10—20 пс. Полученные оценки точностных характеристик свидетельствуют о соответствии СОДС ШВ перспективным требованиям к высокоточным системам синхронизации.

Важнейшим преимуществом предложенной схемы является возможность синхронизации ШВ с помощью един-

ственного оптического волокна произвольной длины. При этом время задержки распространения сигналов в оптоволокне алгоритмически исключается из выражения для расхождения ШВ. Интервал времени, образующий мертвую зону между единичными измерениями, составляет порядка 10 мкс, что позволяет проводить многократные (с частотой до десятков кГц) сличения в течение секундного цикла. При условии достаточной прозрачности оптоволокна, что необходимо и для других методов, это обеспечивает независимость точности синхронизации от состояния линии связи, возможность синхронизации ШВ между объектами, расположенными на значительном удалении в произвольных точках, в том числе вследствие использования темного волокна.

Таким образом, применение СОДС ШВ позволит: повысить точность синхронизации ШВ между наземными пунктами по сравнению с существующими методами в результате использования оптических сигналов, оптоэлектронных модулей, таймеров событий и генераторов с широкой полосой пропускания; обеспечить погрешность сравнения ШВ не более 100 пс; повысить надежность и оперативность сравнения ШВ вследствие применения ВОЛС; обеспечить возможность сравнения или синхронизации ШВ между объектами, расположенными на значительном удалении в произвольных точках, с одного оптического волокна произвольной длины, в том числе темного волокна, арендуемого у операторов общедоступных сетей связи.

Литература

1. Игнатенко И. Ю. и др. Формирование и передача национальной шкалы времени в ГНС ГЛОНАСС // Метрология времени и пространства: докл. 6-го Междунар. симп. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 222—228.
2. Блинов И. Ю. и др. Калибровка канала дуплексных сравнений шкал времени TWSTFT между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ // Труды института прикладной астрономии РАН. 2013. Вып. 27. С. 102—111.
3. Piester D. e. a. Remote atomic clock synchronization via satellites and optical fibers // Adv. Radio Sci. 2011. V. 9. P. 1—7.
4. Иванов А. В. и др. Сличения территориально удаленных эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 23. С. 131—135.
5. Садовников М. А., Федотов А. А., Шаргородский В. Д. Высокоточная односторонняя лазерная дальнометрия: состояние и перспективы применения в ГЛОНАСС // Труды института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 23. С. 61—69.
6. Садовников М. А., Сумерин В. В. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 3(7). С. 39—42.
7. Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Комплекс аппаратуры контроля характеристик оптического излучения и структуры сигнала // Оптика, фотоника и опто-информатика в науке и технике: Тез. докл. науч.-практ. конф. Москва, 2013. С. 54.

Дата принятия 01.10.2014 г.

681.2.088

Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС

О. В. ДЕНИСЕНКО, В. Н. ФЕДОТОВ, И. С. СИЛЬВЕСТРОВ,
Ф. Р. СМЕРНОВ, Н. Р. БАЖЕНОВ, Л. Б. ГЕРИЕВА

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
Менделеево, Россия, e-mail: denisenko@vniiftri.ru

Рассмотрены комплексы метрологического обеспечения для развития и использования глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) на период до 2016 г. Предложен подход к абсолютной калибровке беззапросных средств измерений, используемых для частотно-временного обеспечения этой системы, проведен эксперимент по подтверждению его правильности.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, метрологическое обеспечение, абсолютная калибровка.

The metrological assurance complexes currently created in order to achieve the characteristics of GLONASS for the period until 2016 are considered. An approach for realization of absolute calibration of navigation equipment used for time-frequency support of GLONASS is proposed. The results of experiments to validate the correctness of the proposed approach are presented.

Key words: GLONASS, metrological assurance, measuring instruments, absolute calibration.

В федеральной целевой программе (ФЦП) [1] установлены высокие требования к погрешности определения потребителем своего местоположения в реальном времени в государственной геоцентрической системе координат при использовании космического комплекса ГЛОНАСС. Комплекс состоит из орбитальной группы навигационных космических аппаратов (НКА) и наземного комплекса управления. Задан-

ные требования к указанной погрешности обуславливают потенциальную точность, с которой потребитель принимает сигналы системы идеальным приемником, у которого отсутствуют собственные (инструментальные) погрешности измерений, а также погрешности, обусловленные средой распространения навигационных сигналов (ионосферные, тропосферные и возникающие при эффекте многолучевости).