

Система передачи эталонных сигналов частоты и времени измерительным средствам наземного комплекса ГЛОНАСС по оптическому кабелю

О. В. КОЛМОГОРОВ, А. Н. ЩИПУНОВ, Д. В. ПРОХОРОВ, С. С. ДОНЧЕНКО,
С. Г. БУЕВ, А. Н. МАЛИМОН, Р. И. БАЛАЕВ, Д. М. ФЁДОРОВА

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия,
e-mail: kolmogorov32@rambler.ru

Предложена система передачи эталонных сигналов частоты и времени к беззапросным и запросным измерительным средствам наземного комплекса ГЛОНАСС для контроля бортовых шкал времени навигационных космических аппаратов системы. Предложенная система передачи реализована с применением волоконно-оптических линий связи. Приведены результаты экспериментальных исследований погрешности передачи эталонных сигналов частоты и времени с помощью волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: эталонные сигналы, частота, шкала времени, волоконно-оптическая линия связи, объектовый оптический кабель.

The design of transmission system of reference standard frequency and time signals to non-interrogative and interrogative measuring instruments of GLONASS ground complex for control of the onboard time scales of navigation spacecrafts is proposed. The scheme of the transmission system was realized using fiber optical links. The results of experimental research of the error in transmission of RFTS using the fiber optical links are presented.

Key words: reference standard frequency and time signals (RFTS), frequency, time scale, fiber optical link, object fiber.

Одной из основных функций наземного комплекса (НК) глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС является проведение измерений с целью определения расхождений бортовых шкал времени (ШВ) навигационных космических аппаратов и системной ШВ ГЛОНАСС, а также их синхронизация. Для решения указанных задач используют измерительные средства, размещённые на специально оборудованных объектах НК ГЛОНАСС (контрольных станциях, измерительных комплексах и др.). К таким средствам относятся беззапросные и запросные радиотехнические средства, квантово-оптические системы, а также комплексы метрологического обеспечения ГЛОНАСС, например стационарный комплекс метрологического обеспечения средств оценки характеристик беззапросных и запросных измерительных средств [1].

Для функционирования измерительных средств объекта НК ГЛОНАСС необходимо доставлять к ним эталонные сигналы частоты и времени (ЭСЧВ) от размещённого на том же объекте эталона, являющегося источником сигналов частоты и времени (ИСЧВ). Расстояния между пунктами размещения на объекте измерительных средств и эталона могут составлять от нескольких десятков метров до нескольких километров.

В современных эталонах в качестве хранителей шкалы времени (ШВ) и источников стабильной частоты используют водородные стандарты частоты нового поколения, нестабильность частоты которых на суточных интервалах усреднения составляет $3 \cdot 10^{-16}$ [2]. Такие водородные стандарты частоты, а также более совершенные измеритель-

ные средства ГЛОНАСС будут установлены на объектах НК. Это выдвигает новые высокие требования к системам передачи ЭСЧВ на объектах НК. Так, современные требования к системам передачи ЭСЧВ на несколько километров в пределах объекта НК ГЛОНАСС предусматривают инструментальную погрешность менее 100 пс.

Использование систем передачи ЭСЧВ на основе коаксиальных кабелей длиной свыше 100 м не удовлетворяет требованиям по точности из-за значительного затухания и вариаций задержки передаваемых сигналов при изменениях температуры окружающей среды [3]. Наибольшую точность передачи на указанные расстояния могут обеспечить системы, передающие ЭСЧВ по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), но при длине линии более нескольких километров такие системы должны дополняться устройствами компенсации вносимых ВОЛС возмущений фазы передаваемого сигнала [4–6].

В настоящее время опубликован ряд работ, посвящённых исследованиям в области передачи ЭСЧВ по ВОЛС, например [7–9]. Однако в этих работах основное внимание уделяется сличению удалённых эталонов метрологических центров и научно-исследовательских лабораторий, и не рассматриваются вопросы создания систем, обеспечивающих передачу ЭСЧВ потребителям (измерительным средствам и комплексам) по объектовым оптическим кабелям.

Для передачи ЭСЧВ средствам НК ГЛОНАСС с помощью объектовых ВОЛС предложена система, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

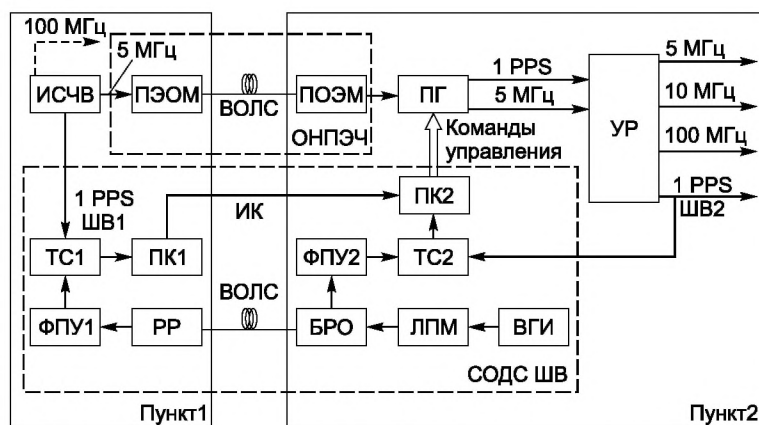


Рис. 1. Функциональная схема системы СП ЭСЧВ:

ИСЧВ – источник эталонных сигналов частоты и времени; 1 PPS ШВ1, 1 PPS ШВ2 – сигналы секундных меток шкал времени пунктов 1 и 2; ОНПЭЧ – система однонаправленной передачи эталонной частоты; ПЭОМ, ПОЭМ – передающий электронно-оптический и приёмный оптико-электронный модули, соответственно; ПГ – промежуточный генератор; УР – комплект аппаратуры для усиления и распределения сигналов секундных меток и опорных частот; СОДС ШВ – система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени; ТС1, ТС2 – таймеры событий; ФПУ1, ФПУ2 – фотоприёмные устройства; РР – ретрорефлектор; ПК1, ПК2 – компьютеры; ИК – информационный канал; ВГИ – вспомогательный генератор импульсов; ЛПМ – лазерный передающий модуль; БРО – блок разветвителей-объединителей

Система передачи ЭСЧВ включает систему однонаправленной передачи эталонного сигнала (ОНПЭЧ) частотой 5 МГц от ИСЧВ по одной из жил волоконно-оптического кабеля и систему одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ), предложенную в [10, 11] и использующую другую жилу волоконно-оптического кабеля. Аппаратура системы передачи ЭСЧВ размещается в двух пунктах, соединённых оптическим кабелем: в пункте 1, где установлен ИСЧВ, и в пункте 2, где находится измерительное средство из состава НК ГЛОНАСС.

Поясним принцип действия системы передачи ЭСЧВ. Функционально система разделена на две основные части: система ОНПЭЧ передаёт на оптической несущей по ВОЛС эталонный синусоидальный сигнал частотой 5 МГц; СОДС ШВ обеспечивает формирование в пункте 2 ШВ, согласованной с эталонной ШВ пункта 1.

Принцип действия ОНПЭЧ состоит в следующем. Опорный эталонный радиосигнал частотой 5 МГц от ИСЧВ поступает на передающий электронно-оптический модуль ПЭОМ (см. рис. 1) и модулирует оптическую несущую. Излучение распространяется по ВОЛС до пункта на объекте, к которому надо доставить сигнал, и там преобразуется с помощью приёмного оптико-электронного модуля ПОЭМ обратно в радиосигнал опорной частоты. Переданный по ВОЛС сигнал опорной частоты подаётся на промежуточный генератор ПГ НРОГ, который формирует секундные метки времени, управляет их фазой, а также формирует синусоидальный сигнал с регулируемой отстройкой выходной частоты. С выхода промежуточного генератора сигнал частотой 5 МГц попадает на комплект аппаратуры для усиления и распределения сигналов секундных меток и опорных частот УР, ко-

торая формирует и распределяет сигналы частотами 5; 10; 100 МГц и сигнал времени 1 PPS потребителям, т. е. измерительным средствам НК ГЛОНАСС. На основе секундных меток времени 1 PPS промежуточного генератора формируется ШВ в пункте 2. СОДС ШВ определяет расхождение эталонной ШВ ИСЧВ, формируемой в пункте 1, и ШВ, формируемой в пункте 2. Ниже будет объяснен принцип действия СОДС ШВ, которая вырабатывает управляющий сигнал для корректировки положения сигнала 1 PPS на выходе промежуточного генератора. Управляющий сигнал используется для устранения рассогласования ШВ пунктов 2 и 1.

Изменения температуры окружающей среды оказывают влияние на оптический кабель и приводят к вариациям задержки фазы передаваемого радиосигнала. Температурный коэффициент задержки сигнала в волоконной жиле оптического кабеля составляет $40 \text{ пс/}^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}$ [3]. На точность передачи фазы ЭСЧВ влияет также ряд физических факторов, присущих оптическому волокну: поляризационная модовая дисперсия; хроматическая дисперсия и вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна. Однако в коротких ВОЛС длиной до нескольких километров основным фактором, определяющим погрешность передачи ЭСЧВ, является нестабильность температуры окружающей среды (амплитуда колебаний температуры и скорость её изменения). Влияние этого фактора при передаче ЭСЧВ на расстояние до 5 км теоретически оценено в [3, 5] и было измерено в процессе экспериментальных исследований системы передачи. Относительное среднее квадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО) частоты сигнала, переданного по линии длиной 3 км, не превышало $4\cdot 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения, что подтверждает возможность передачи эталонного сигнала частоты в коротких линиях без использования устройств компенсации возмущений, вносимых линией.

Принцип действия СОДС ШВ состоит в следующем. Вспомогательный генератор импульсов ВГИ (см. рис. 1) в течение секундного цикла формирует последовательность электрических импульсов, поступающих на лазерный передающий модуль ЛПМ, который преобразует их в импульсы оптического излучения. С выхода лазерного передающего модуля оптические импульсы поступают в блок разветвителей-объединителей БРО, обеспечивающий передачу оптических импульсов в ВОЛС и ответвление части мощности каждого оптического импульса на вход фотоприёмного устройства ФПУ2. Таймер событий ТС2, принимая сигнал с выхода фотоприёмного устройства ФПУ2 и импульсный сигнал времени 1 PPS, определяет момент t_i излучения каждого i -го оптического импульса в шкале времени пункта 2 ШВ2.

Переданный по ВОЛС в пункт 1 оптический импульс через ретрорефлектор РР поступает в фотоприёмное устройство ФПУ1, подключенное к таймеру событий ТС1. Таймер событий ТС1, принимая сигнал с выхода фотоприёмного устройства ФПУ1 и эталонный сигнал времени 1 PPS от

ИСЧВ, определяет время τ_i прихода i -го оптического импульса в ШВ пункта 1.

Ретрорефлектор отражает часть мощности оптического импульса в обратном направлении, импульс проходит по ВОЛС в пункт 2 и через блок разветвителей-объединителей поступает на вход фотоприёмного устройства ФПУ2, подключенного к таймеру событий ТС2. С помощью таймера событий ТС2 определяется момент τ_{2i} прихода i -го отражённого импульса в ШВ пункта 2.

Отметим, что время прохождения оптического импульса по ВОЛС протяжённостью десятки километров составляет не более сотен микросекунд. Изменения длины ВОЛС за столь малые интервалы времени, вызванные колебаниями температуры, не приводят к изменениям задержек распространения сигналов. Поэтому задержки распространения каждого оптического импульса при прохождении по ВОЛС в прямом и обратном направлениях остаются равными.

Компьютеры пунктов 1,2 (ПК1, ПК2), обрабатывающие измерительную информацию, объединены в локальную сеть FastEthernet. По локальной сети информация с ПК1 о моментах времени τ_i поступает в ПК2 для последующей обработки измерительных данных, поступающих с таймеров событий пунктов 1, 2.

На основе способа, изложенного в [11], по результатам серии измерений, выполненных за время секундного цикла работы СОДС ШВ, в ПК2 определяется расхождение шкал времени

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\tau_{2i} - \frac{\tau_{2i} + t_i}{2} \right),$$

где n – количество измерений.

Для проверки точностных характеристик предложенной системы передачи ЭСЧВ была собрана экспериментальная установка. Всё оборудование установки находилось в лаборатории в одной стойке. В качестве ВОЛС использовали две волоконные бухты длиной по 3 км. По одной из них система передачи ЭСЧВ передавала эталонный сигнал частоты от водородного хранителя, входящего в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ1–2012 [12]. Таким образом, в качестве ИСЧВ использовали водородный мазер с нестабильностью частоты $5 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения. Вторая оптоволоконная бухта была предназначена для сравнения эталонной и переданной ШВ с помощью СОДС ШВ. В ходе эксперимента определяли погрешность передачи на 3 км ЭСЧВ частотой 5 МГц и 1 PPS, генерируемых водородным хранителем.

Для определения погрешности передачи эталонного сигнала частотой 5 МГц применяли анализатор фазовых шумов Symmetricom 5125A, на входы которого подавали сигналы частотой 5 МГц с водородного хранителя и промежуточного генератора. С помощью анализатора определяли СКДО при передаче частоты. Климатические условия в лаборатории контролировали измерителем влажности и температуры ИВТМ-7 М. Колебания температуры в лаборатории за время измерений не превышали $\pm 2^\circ\text{C}$.

Результаты измерений СКДО сигнала частотой 5 МГц, переданного по ВОЛС на 3 км, при использовании системы ОНПЭЧ, передающей ЭСЧВ частотой 5 МГц без компенсации, приведены на рис. 2 (кривая 1). В составе системы передачи ЭСЧВ была также опробована работа системы двуправленной передачи эталонной частоты (ДНПЭЧ), которая обеспечивала электронную компенсацию возмущений, вносимых линией, выполненной в виде волоконной бухты длиной 3 км.

Система ДНПЭЧ была собрана по схеме, приведённой в [13]. Система ДНПЭЧ передавала от водородного хранителя по ВОЛС эталонный сигнал частотой 100 МГц. Для получения в системе ДНПЭЧ выходного сигнала частотой 5 МГц описанная в [13] система передачи эталонного сигнала по ВОЛС была дополнена делителем частоты. С выхода делителя сигнал частотой 5 МГц через фильтр поступал на промежуточный генератор. Выбор выходного сигнала водородного хранителя частотой 100 МГц объясняется тем, что система ДНПЭЧ обеспечивают более точную коррекцию возмущений фазы передаваемого сигнала по мере роста его частоты. При увеличении частоты передаваемого сигнала пропорционально увеличивается амплитуда сигнала фазовой ошибки, который вырабатывает фазовый детектор, сравнивающий возмущённый линией сигнал с ЭСЧВ. Поэтому одинаковое изменение длины ВОЛС, возникающее, например, из-за изменения её температуры, при передаче более высокочастотного сигнала даёт сигнал фазовой ошибки с более высоким отношением сигнал–шум. В результате при передаче по ВОЛС сигнала частотой 100 МГц обеспечивается на порядок более точная компенсация вносимых линией возмущений фазы, чем в случае передачи сигнала частотой 5 МГц.

Для определения погрешности передачи ЭСЧВ в конце ВОЛС длиной 3 км с помощью системы ДНПЭЧ также использовали анализатор Symmetricom 5125A, на входы которого подавали сигналы частотой 5 МГц с водородного хранителя и промежуточного генератора. В процессе измерений с помощью анализатора определяли СКДО.

Результаты измерений СКДО сигнала частотой 5 МГц, переданного системой ДНПЭЧ по ВОЛС на 3 км, показаны

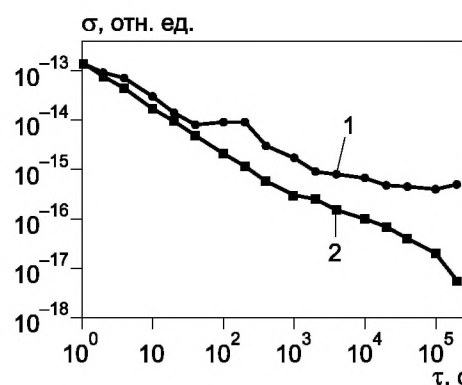


Рис 2. СКДО σ частоты ЭСЧВ, переданного по ВОЛС длиной 3 км, при использовании систем ОНПЭЧ (кривая 1) или ДНПЭЧ (кривая 2)

на рис. 2 (кривая 2). Согласно данным рис. 2 дополнительная погрешность (СКДО) передачи ЭСЧВ по ВОЛС длиной 3 км при использовании ОНПЭЧ составляет $5 \cdot 10^{-16}$, а при применении ДНПЭЧ $6 \cdot 10^{-18}$ на интервале усреднения $2 \cdot 10^5$ с. Сравнение этих результатов измерений подтверждает, что на двухсуточном интервале усреднения погрешность передачи ЭСЧВ от водородного хранителя по ВОЛС длиной 3 км уменьшается на два порядка при применении системы ДНПЭЧ.

Следует отметить, что при длине ВОЛС более 3 км необходимо применять в составе системы передачи ЭСЧВ систему ДНПЭЧ, которая может обеспечить передачу частоты водородного хранителя по ВОЛС практически без потери точности на расстояние до 100 км [5], а при использовании промежуточного двунаправленного оптического усилителя на расстояние до 200 км [13].

Экспериментальные исследования системы передачи ЭСЧВ при передаче ШВ проводили с использованием методики, изложенной в [14]. В качестве эталонного измерителя временных интервалов применяли частотомер 53230А, работающий от сигнала опорной частоты с водородного стандарта. При определении погрешности передачи ШВ исследуемый измеритель временных интервалов непрерывно измерял временные интервалы между фронтами импульсов 1 PPS, генерируемых водородным хранителем и промежуточным генератором. По результатам эксперимента установлено, что границы погрешности передачи ШВ системой передачи ЭСЧВ по ВОЛС длиной 3 км не превышают ± 90 пс (при доверительной вероятности 0,95). Кроме того, в работе [14] показано, что применяемые в СОДС ШВ устройства обеспечивают её работоспособность при протяженности ВОЛС до 30 км.

Проведённые исследования подтверждают возможность применения предложенной системы передачи ЭСЧВ по ВОЛС для реализации высокоточной передачи ЭСЧВ на расстояние до 30 км.

Л и т е р а т у р а

1. Денисенко О. В., Федотов В. Н., Сильвестров И. С., Смирнов Ф. Р., Баженов Н. Р., Гериева Л. Б. Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 17–20.
2. Беляев А. А., Блинов И. Ю., Демидов Н. А., Медведев С. Ю., Пастухов А. В., Сахаров Б. А. Аппаратура водородных хранителей эталонов единиц времени и частоты // Вестник метролога. 2015. № 2. С. 14–23.
3. Балаев Р. И., Шibaева Д. М., Малимон А. Н., Курчанов А. Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном времени и частоте // Альманах современной метрологии.

2015. № 2. С. 165–179.

4. Малимон А. Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // Альманах современной метрологии. 2016. № 8. С. 198–268.

5. Фёдорова Д. М., Балаев Р. И., Курчанов А. Ф., Троян В. И., Малимон А. Н. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 34–37.

6. 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 // Submitted to Metrologia. August, 2012. [Электрон. ресурс]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.4467.pdf> (дата обращения 20.03.2017).

7. Иванов А. В., Моховиков Н. В., Каган С. Н., Малимон А. Н., Пестерев С. В., Пальчиков В. Г., Галышев А. А. Сличения территориально удаленных эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 131–135.

8. Predehl K., Grosche G., Raupach S. M. F., Droste S., Terra O., Alnis J., Legero Th., Hänsch T. W., Udem Th., Holzwarth R., Schnatz H. A 920-Kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place // Science. 2012. V. 336. P. 441–444.

9. Fujieda Miho, Kumagai Motohiro, Nagano Shigeo, Ido Tetsuya. Frequency Transfer Using Optical Fibers // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. 2010. V. 57. No. 3/4. P. 209–217.

10. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Синхронизация шкал времени удаленных объектов с помощью системы одно- и двухсторонних сравнений // Мир измерений. 2016. № 3 (173). С. 26–29.

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

12. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Норец И. Б. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 3–8.

13. Балаев Р. И., Малимон А. Н., Фёдорова Д. М., Курчанов А. Ф., Троян В. И. Передача эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 38–42.

14. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В., Був С. Г. Результаты экспериментальных исследований системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Альманах современной метрологии. 2017. № 9. С. 117–121.

Дата принятия: 23.05.2017.