

УДК 006.924.4

СИСТЕМА ВСТРЕЧНЫХ СРАВНЕНИЙ ШКАЛ ВРЕМЕНИ**Колмогоров О.В., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Щипунов А.Н., Буев С.Г.**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево Московская обл.,

nio8@vniiftri.ru

Предложен способ сравнения и синхронизации шкал времени удаленных наземных объектов с помощью системы встречных сравнений с использованием оптоволоконной линии связи. На каждом из объектов происходит излучение оптических импульсов в оптоволоконную линию, в шкале времени каждого объекта определяются моменты времени излучения импульсов с этого объекта и моменты времени приема импульсов, пришедших по оптоволоконной линии с другого объекта. На основании полученных данных определяется расхождение шкал времени объектов. Предложена схема системы, реализующей указанный способ, показана возможность синхронизации шкал времени с погрешностью не более 100 пс.

Method of remote ground-based objects time scales comparison and synchronization by means of oncoming comparisons system via the fiber-optical communication line is offered. On each of objects optical pulses are emitted into the fiber-optical line, timepoints of pulses radiation and timepoints of pulses reception, received via the fiber-optical line from other object, in a time scale of each object are defined. On the basis of obtained data the objects time scales divergence is defined. The scheme of the system, realizing the specified method is offered and the possibility of time scales synchronization with uncertainty less 100 ps is shown.

Ключевые слова: шкалы времени, сравнение и синхронизация, оптоволоконная линия связи, импульсы

Системы синхронизации шкал времени эталонов времени и частоты удаленных объектов являются важной составляющей средств метрологического обеспечения ГНС ГЛОНАСС [1-3]. Они также применяются для синхронизации шкал времени измерительных средств полигонов и комплексов, для синхронизации эталонов частоты и времени, используемых в системах передачи информации.

В состав комплекса средств, обеспечивающих контроль и определение характеристик средств измерений из состава системы ГЛОНАСС входят, в том числе, средства метрологического обеспечения системы синхронизации шкал времени ГНС ГЛОНАСС, а также радиотехнические средства, обеспечивающие контроль характеристик космического сегмента, – комплекс метрологического обеспечения средств оценки характеристик беззапросных (БИС) и запросных (ЗИС) измерительных средств. Для решения задачи оценки характеристик БИС и ЗИС необходима высокоточная синхронизация шкал времени (ШВ), а именно ШВ комплекса с ШВ Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени.

Также одним из средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС являются высокоточные системы лазерной дальнометрии – квантово-оптические станции (КОС), которые обеспечивают решение целевых задач в части уточнения фундаментальных астрономо-геодезических параметров, достижения уровня точности привязки Государственной геоцентрической системы координат (ГГСК) к центру масс Земли, высокоточного определения параметров связи ГГСК с Международной общеземной системой координат, а также прецизионного согласования шкал времени ГЛОНАСС с ШВ Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени [4]. Для обеспечения требуемой точности при решении задач дальнометрии КОС оснащены водородными стандартами времени и частоты, используемыми в качестве хранителей локальных шкал времени. Для решения задач контроля ШВ космических аппаратов ГЛОНАСС локальные шкалы времени КОС должны быть с максимально возможной точностью синхронизированы с национальной шкалой координированного времени UTC (SU) или с ШВ центрального синхронизатора системы ГЛОНАСС.

На сегодняшний день наилучшую точность синхронизации шкал времени удаленных объектов на дистанциях в несколько сотен километров обеспечивают системы, использующие волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [5,6] между объектами. Различные способы характеризуются случайной погрешностью синхронизации, выраженной в виде среднего квадратического отклонения, от 50 пс на дистанциях до 5 км и до 100-120 пс на дистанциях порядка 100 км. В работе [7] была предложена система одно- и двусторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ) [8]. Преимуществами СОДС ШВ по сравнению с другими системами является использование одного оптического волокна, алгоритмическое исключение времени прохождения оптического импульса в волокне, исключение влияния нестабильности временного положения фронтов импульсов генератора импульсов и лазерного передающего модуля на точность сравнения, возможность поэлементной калибровки системы.

Проведенные экспериментальные исследования СОДС ШВ ([9]) показали, что случайная погрешность системы, выраженная в виде СКО, не превышает 10-15 пс, а достижимый уровень неисключенной систематической погрешности составляет 10-20 пс. При этом показана работоспособность системы на дистанции до 30 км, и выявлено, что выбор энергетических и спектральных характеристик волоконно-оптических устройств может позволить увеличить расстояние между объектами, однако это может сопровождаться увеличением случайной погрешности из-за необходимости работы с оптическими сигналами малых уровней интенсивности. Принципиальным фактором, ограничивающим дальность действия СОДС ШВ, является то, что мощность импульсов с лазерного передающего модуля делится полупрозрачным зеркалом между двумя фотоприемными модулями и отраженные импульсы проходят по ВОЛС двойной путь, испытывая двойное ослабление.

Для повышения дистанции синхронизации шкал времени более чем в два раза по сравнению с СОДС ШВ, при практически той же погрешности синхронизации, авторами разработана система встречных сравнений шкал времени СВС ШВ [10]. Структурная схема СВС ШВ для синхронизации шкалы времени объекта 2 со шкалой времени объекта 1 приведена на рис. 1.

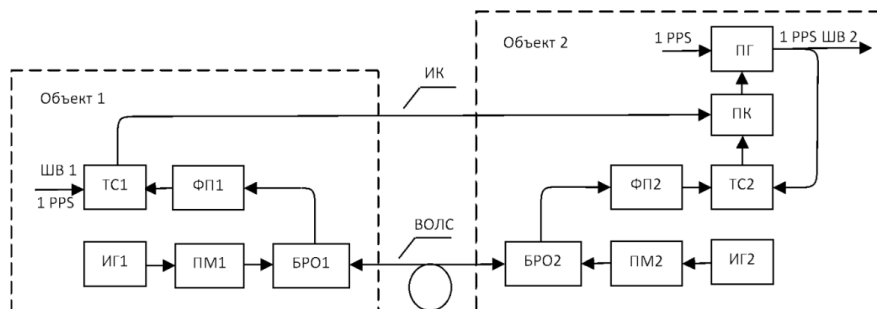


Рис. 1. Функциональная схема СВС ШВ

ШВ 1 и ШВ 2 – шкалы времени, ТС1 и ТС2 – таймеры событий, ФП1 и ФП2 – фотоприемники, ИГ1 и ИГ2 – импульсные генераторы, ПМ1 и ПМ2 – передающие модули, БРО1 и БРО2 – блок разветвителей-объединителей, ИК – информационный канал, ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи, ПК – компьютер, ПГ – промежуточный генератор

Шкала времени первого объекта (ШВ1) формируется эталоном единиц времени и частоты (ЭВЧ) в виде физических сигналов 1 PPS (секундные метки времени). В качестве формирователя шкалы времени второго объекта (ШВ2) используется промежуточный генератор (ПГ), на вход которого со стандарта частоты поступает сигнал 1 PPS, не синхронизированный со шкалой времени первого объекта. Для синхронизации двух ШВ используется СВС ШВ. Связь между элементами СВС ШВ, размещенными на разных объектах, осуществляется по ВОЛС, проложенной между этими объектами, и по информационному каналу (ИК).

На первом объекте в произвольные моменты времени с импульсного генератора (ИГ1) на лазерный передающий модуль (ПМ1) с определенной частотой поступают электрические импульсы, которые ПМ1 преобразует в оптические импульсы. Каждый оптический импульс с ПМ1 поступает на вход блока разветвителей-объединителей (БРО1), некоторая часть мощности оптического импульса поступает в фотоприемник (ФП1) оптических импульсов первого объекта, основная часть мощности импульса поступает в оптоволоконную линию связи. Электрический сигнал с ФП1 поступает в таймер событий (ТС1) первого объекта, который фиксирует момент излучения оптического импульса t_1 в шкале времени первого объекта ШВ1 в виде секундных меток 1 PPS, которые также поступают в ТС1. Информация о моменте излучения оптического импульса t_1 по ИК, например, сети Ethernet, поступает в компьютер (ПК), расположенный на втором объекте.

Альманах современной метрологии, 2017, № 9

Оптический импульс, пришедший с первого объекта по оптоволоконной линии связи на второй объект через БРО2, поступает в ФП2 второго объекта, который преобразует его в электрический сигнал, поступающий в ТС2 второго объекта. Также в ТС2 поступает сигнал 1 PPS с промежуточного генератора (ПГ), что позволяет определить время τ_1 прихода оптического импульса в шкале времени второго объекта ШВ2, формируемой ПГ. Информация о моменте прихода оптического импульса τ_1 направляется в ПК.

На втором объекте электрические импульсы с ИГ2 поступают на ПМ2, который преобразует их в оптические импульсы. Каждый оптический импульс с ПМ2 поступает на вход БРО2, некоторая часть мощности оптического импульса поступает в ФП2 второго объекта, основная часть мощности импульса поступает в ВОЛС. Электрический сигнал с ФП2 поступает в ТС2, который фиксирует момент излучения оптического импульса t_2 в шкале времени второго объекта, информация о моменте излучения оптического импульса t_2 с ТС2 поступают в ПК. Оптический импульс, пришедший по ВОЛС со второго на первый объект через БРО1, поступает в ФП1, который преобразует его в электрический сигнал, поступающий в ТС1, который определяет время t_2 прихода оптического импульса в шкале времени первого объекта. Информация о моменте прихода оптического импульса t_2 поступает по ИК в ПК.

За время цикла сравнения шкал времени с учетом различной частоты генерации импульсов или их длительности с помощью программного обеспечения определяется с какого объекта, – своего или противоположного, поступил данный импульс.

Временная диаграмма работы устройства показана на рисунке 2, где 1 и 2 – шкала времени первого и второго объектов соответственно, t^1 и t^2 – секундные метки 1 PPS шкал времени первого и второго объектов соответственно.

На основании данных о значениях t_1 , t_2 , τ_1 , τ_2 , определяется расхождение шкал времени удаленных объектов Δt по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{2} + \frac{\tau_2 - \tau_1}{2}, \quad (1)$$

где t_1 – измеренное время излучения оптического импульса с первого объекта в шкале времени первого объекта,

t_2 – измеренное время излучения оптического импульса со второго объекта в шкале времени второго объекта,

τ_1 – измеренное время прихода оптического импульса с первого объекта на второй объект в шкале времени второго объекта,

τ_2 – измеренное время прихода оптического импульса со второго объекта на первый объект в шкале времени первого объекта.

На основе полученного значения расхождения шкал времени Δt ПК вырабатывает управляющую команду, по которой ПГ синхронизирует шкалу времени второго объекта со шкалой времени первого.

Усреднение данных за время цикла сравнения по каждой паре импульсов обеспечивает повышение точности сравнения и синхронизации шкал времени за счет уменьшения случайной составляющей погрешности, обусловленной шумами аппаратуры и оптоволоконной линии связи. Случайная составляющая погрешности СВС ШВ, выраженная в виде СКО, оценивается на уровне 10 – 30 пс.

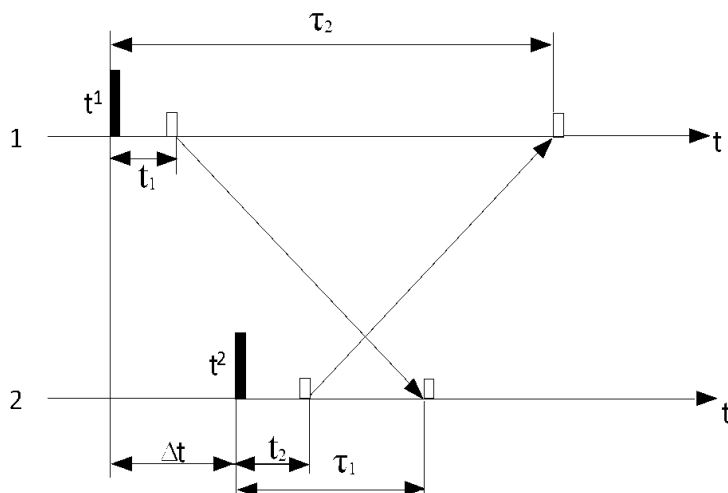


Рис. 2. Временная диаграмма работы СВС ШВ

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) СВС ШВ Θ_Σ зависит от погрешности измерений интервалов времени таймерами событий и погрешности определения аппаратурной поправки, учитывающей задержки в оптических кабелях и электронных устройствах системы. Для расчета НСП СВС ШВ используем выражение:

$$\Theta_\Sigma = 1,1 \sqrt{\frac{1}{4} \Theta_{t_1}^2 + \frac{1}{4} \Theta_{t_2}^2 + \frac{1}{4} \Theta_{\tau_2}^2 + \frac{1}{4} \Theta_{\tau_1}^2 + \Theta_{АПП}^2}, \quad (2)$$

где Θ_{t_1} – погрешность измерений интервала времени t_1 таймером событий 1;

Θ_{t_2} – погрешность измерений интервала времени t_2 таймером событий 2;

Θ_{τ_1} – погрешность измерений интервала времени τ_1 таймером событий 2;

Θ_{τ_2} – погрешность измерений интервала времени τ_2 таймером событий 1;

$\Theta_{АПП}$ – погрешность определения аппаратурной поправки.

Значения НСП системы СВС ШВ, полученные в результате расчетов по формуле (2), приведены на графиках, представленных на рис. 3. Из графиков следует, что НСП системы СОДС ШВ не превысит 100 пс при использовании таймеров событий с погрешностью 70 – 80 пс, а при использовании наиболее точных из существующих таймеров событий с погрешностью около 10 пс НСП системы составит 20 – 50 пс, что соответствует современным требованиям к наиболее точным системам синхронизации шкал времени.

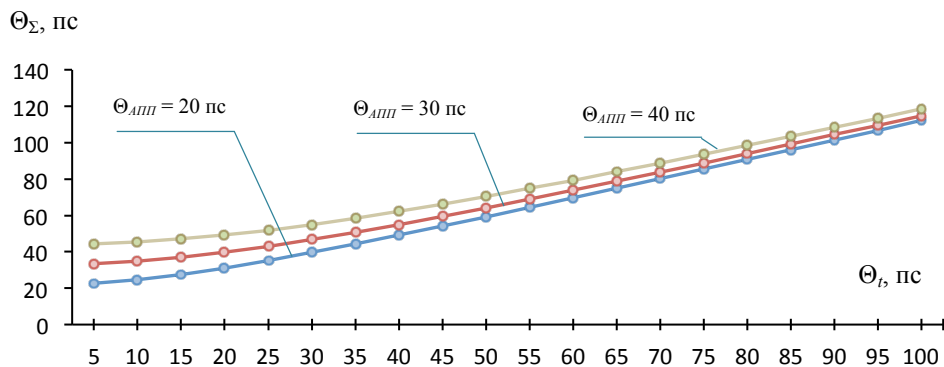


Рис. 3. Зависимость НСП системы СОДС ШВ Θ_{Σ} от погрешности таймеров событий Θ_t и погрешности определения аппаратной поправки $\Theta_{АПП}$

Оценки дальности действия СВС ШВ показывают, что применение стандартных приемных и передающих оптоволоконных модулей обеспечит дальность работы СВС ШВ не менее 100 км для стандартного оптического волокна SMF-28. Причем выявлено, что за счет выбора энергетических и спектральных характеристик волоконно-оптических устройств СВС ШВ на основе учета параметров ВОЛС, соединяющих пункты размещения синхронизируемых эталонов, можно значительно повысить дальность работы СВС ШВ.

Таким образом, применение СВС ШВ позволит:

- повысить точность синхронизации шкал времени между наземными пунктами по сравнению с существующими методами за счет применения ряда технических решений, отработанных в СОДС ШВ;
- обеспечить возможность сравнения или синхронизации шкал времени между объектами, расположенными на удалении 100 км и более за счет применения оригинальной схемы СВС ШВ с использованием встречного излучения оптических импульсов.

Литература

1. Донченко С.И., Щипунов А.Н., Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Федотов В.Н., Гончаров А.С. Метрология в системе ГЛОНАСС: текущее состояние и перспективы развития// Альманах современной метрологии, 2014, № 1, с. 48-64.
2. Капитонов А.Л., Блинов И.Ю., Смирнов Ю.Ф. Реализация национальной шкалы времени UTC (SU) и её передача в наземный комплекс управления ГЛОНАСС// Альманах современной метрологии, 2014, № 1, с. 65-74.
3. Пальчиков В.Г. Деятельность Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли в Российской Федерации и за её пределами// Альманах современной метрологии, 2016, № 8, с. 26-52.
4. Игнатенко И.Ю. Сличение удпленных шкал на основе методов лазерной дальнометрии// Альманах современной метрологии, 2016, № 8, с. 148-161.
5. Малимон А.Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям// Альманах современной метрологии, 2016, № 8, с. 198-268.
6. Кошеляевский Н.Б., Домнин Ю.С. Направление и перспективы развития измерений времени и частоты на основе материалов 20-й сессии Консультативного Комитета по времени и частоте 2015// Альманах современной метрологии, 2016, № 7, с. 93-123.
7. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени// Измерительная техника, 2015, № 1.
8. Пат. 2 547 662 РФ. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления / О.В. Колмогоров Д.В. Прохоров; заявитель и патентообладатель ФГУП "ВНИИФТРИ" // Изобретения. Полезные модели, 2015, № 10.
9. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Экспериментальные исследования системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени по оптоволоконной линии связи// Тезисы докладов VI Научно-технической конференции «Прецизионные информационно-измерительные системы. Достижения и перспективы», 2016.
10. Пат. 2 604 852 РФ. Устройство для сравнения и синхронизации шкал времени / Д.В. Прохоров, О.В. Колмогоров, С.С. Донченко; заявитель и патентообладатель ФГУП "ВНИИФТРИ". Оpubл. 10.12.2016, бюл. № 34.