

УДК 006.92+621.396+629.78

## РЕАЛИЗАЦИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ UTC(SU) И ЕЕ ПЕРЕДАЧА В НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ГЛОНАСС

**И.Ю. Блинов, А.Л. Капитонов, Ю.Ф. Смирнов**

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС предназначена для определения потребителями трёх пространственных координат, скорости и точного времени. Система ГЛОНАСС функционирует в собственном системном времени, а опорной для нее является национальная шкала времени. Национальная шкала времени Российской Федерации - это упорядоченная числовая последовательность размеров единиц времени, воспроизводимая и хранимая Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли на основе Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени.

Навигационные космические аппараты системы ГЛОНАСС оснащены высокостабильными бортовыми стандартами частоты и времени, формирующими бортовые шкалы времени, которые необходимо с высокой точностью согласовывать друг с другом. Системной шкалой времени ГЛОНАСС является аналитическая непрерывная шкала времени, которая рассчитывается на основе шкалы времени Центрального синхронизатора системы. Центральный синхронизатор ГЛОНАСС оснащен стандартами частоты и времени, которые на порядок точнее, чем бортовые стандарты частоты и времени. Смещение системной шкалы времени ГЛОНАСС относительно национальной шкалы времени не должно превышать одной миллионной доли секунды. Поправки к шкале системного времени ГЛОНАСС относительно национальной шкалы времени рассчитываются в подсистеме контроля и управления ГЛОНАСС и ежедневно закладываются на борт каждого космического аппарата системы ГЛОНАСС для их передачи потребителю. Расчет поправок производится на основании данных сравнений шкал времени Центрального синхронизатора и Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Российской Федерации (ГЭВЧ) по сигналам наземного телевидения, а также по сигналам спутниковых навигационных систем, в том числе и ГЛОНАСС.

Очевидно, что для достижения максимальной точности определения потребителем координат и значений времени системная шкала времени и бортовые шкалы космических аппаратов должны быть с высокой точностью синхронизированы между собой, а также с национальной шкалой времени UTC(SU).

Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии поручено обеспечение системы ГЛОНАСС эталонными значениями времени и частоты, национальной шкалой времени и данными о параметрах вращения Земли. Эти задачи решаются с помощью средств фундаментального сегмента ГЛОНАСС, основу которого составляют технические средства Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ). Комплекс средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС предназначен для согласования национальной шкалы времени UTC(SU) с Международной шкалой координированного времени UTC; согласования координат объектов на поверхности Земли с координатами в международной земной системе координат и определения параметров вращения Земли (координат полюса и всемирного времени) для эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. В соответствии с решаемыми задачами комплекс средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС включает в себя следующие основные составные части:

- комплекс средств формирования национальной шкалы времени UTC(SU);
- комплекс средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли;
- комплекс средств уточнения фундаментальных астрономо-геодезических параметров.

В рамках мероприятий ФЦП ГЛОНАСС 2007 – 2011 гг. была проведена модернизация средств фундаментального сегмента системы ГЛОНАСС, а именно: эталонов единиц времени, частоты и длины, систем определения параметров вращения Земли и систем сбора и передачи данных в реальном времени, аппаратуры формирования, контроля и управления системы передач эталонных сигналов частоты и времени по коротковолновым, длинноволновым и телевизионным каналам и аппаратуры рабочих эталонов пунктов передачи. В результате проведения запланированных мероприятий ФЦП ГЛОНАСС в 2007 – 2011 гг. создан комплекс технических средств, обеспечивающих воспроизведение единиц времени и частоты, в первую очередь, метрологический цезиевый репер частоты (т.е. периодически включаемая мера частоты) типа «фонтан», использующий технологии лазерного охлаждения атомов и предназначенный для повышения точности независимого воспроизведения

единиц времени и частоты Государственным первичным эталоном времени и частоты.

В результате проведения мероприятий по совершенствованию ГЭВЧ в 2012 году в ФГУП «ВНИИФТРИ» был создан ГЭТ 1-2012, в состав которого вошел метрологический цезиевый репер частоты (МЦР) «Фонтан». МЦР «Фонтан» использует уникальные технологии лазерного охлаждения атомов и обеспечивает повышение точности независимого воспроизведения размера единицы времени ГЭВЧ и на этой основе повышение точности ее хранения вторичными эталонами Росстандарта, Минобороны России и других ведомств. Водородные стандарты частоты и времени, входящие в состав ГЭВЧ, соответствуют лучшим мировым стандартам по стабильности частоты на интервале времени наблюдения 1 – 10 суток. Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты ГЭТ 1-2012 уменьшилась приблизительно в 100 раз в сравнении с ГЭВЧ предыдущего поколения.

#### Основные метрологические характеристики ГЭТ 1-2012

Характеристика, единица измерения	Допускаемое значение
Относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерений при воспроизведении единиц времени и частоты при интервале времени измерения 1 сут	$\leq 5,0 \cdot 10^{-15}$
Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты	$\leq 5,0 \cdot 10^{-16}$
Пределы допускаемого смещения национальной шкалы координированного времени UTC(SU) относительно Международной шкалы координированного времени UTC, нс	$\pm 10$
Суммарная стандартная неопределенность измерений при передаче шкалы времени методом сличений по сигналам КНС, нс	$\leq 5,0$

В рамках работ по содержанию Государственной службы времени и частоты и определения параметров вращения Земли к настоящему времени все основные метрологические характеристики ГЭВЧ экспериментально подтверждены. В результате проведения в 2013 году международных

сличений цезиевого репера с первичными стандартами частоты других стран, он был официально признан Международным бюро мер и весов (МБМВ) и его данные используются при расчете Международной шкалы атомного времени ТАІ.

В ходе совершенствования Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени была разработана новая стратегия реализации национальной шкалы времени UTC(SU) [1], основанная на системном подходе к развитию средств и методов воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты, непрерывном совершенствовании характеристик ГЭВЧ, направленная на удовлетворение потребностей государства в точности и оперативности частотно-временной информации, распространяемой ГСВЧ. Переход к новой стратегии реализации национальной шкалы времени обеспечил:

1. Независимое формирование национальной шкалы атомного времени ТА(SU) на основе единиц времени и частоты, воспроизводимых метрологическим цезиевым репером типа «Фонтан» в соответствии с определением секунды в Международной системе СИ;

2. Формирование и передачу национальной шкалы времени UTC(SU) внутренним и внешним потребителям с заданными характеристиками в реальном масштабе времени;

3. Повышение надежности предоставления информации о национальной шкале времени UTC(SU) за счет автоматизации технологических процессов формирования, хранения и передачи национальной шкалы времени.

Для обеспечения передачи единиц времени и частоты и шкалы времени UTC(SU) от ГЭВЧ средствам измерений времени и частоты системы ГЛОНАСС в рамках ОКР «Метрология» был создан ряд уникальных комплексов:

- аппаратно-программный комплекс формирования и передачи национальной шкалы времени UTC(SU) в НКУ ГЛОНАСС;

- комплекс средств метрологического обеспечения системы синхронизации ГЛОНАСС;

- комплекс средств передачи единиц времени, частоты и шкалы времени средствам измерений системы синхронизации ГЛОНАСС.

Аппаратно-программный комплекс формирования и передачи национальной шкалы времени UTC(SU) в НКУ ГЛОНАСС АПК ФШВ UTC(SU) предназначен для формирования шкалы времени (сигналов с частотой 1 Гц), приближенной по моменту с заданной точностью к национальной шкале координированного времени UTC(SU), и передачи формируемой шкалы времени в наземный комплекс управления ГЛОНАСС в реальном масштабе времени.

В состав АПК ФШВ UTC(SU) входят комплексы формирования шкалы времени (КФШВ) с прецизионными цифровыми фазовращателями типа HROG-5 и аппаратура передачи сформированной шкалы времени на основе приемников сигналов ГЛОНАСС/GPS типа TTS-4, размещаемые на объектах сравнений шкал времени [2]. КФШВ формирует сигналы 1 Гц из входного сигнала 5 МГц, подаваемого от водородного стандарта времени и частоты (ВС), с учетом линейного прогноза частоты ВС и поправок к шкале времени ВС относительно расчетной шкалы времени. Смещение формируемой шкалы времени КФШВ относительно расчетной шкалы времени поддерживается программными средствами управления в пределах допуска.

Комплекс средств метрологического обеспечения системы синхронизации ГЛОНАСС (КСМО СС) предназначен для передачи единиц времени и частоты и шкалы времени UTC(SU) от ГЭВЧ средствам измерений времени и частоты системы синхронизации ГЛОНАСС, а также для определения их метрологических характеристик. В состав КСМО СС входит эталон–переносчик единиц частоты и времени и комплекс контроля метрологических характеристик системы синхронизации ГНСС ГЛОНАСС.

Комплекс средств метрологического обеспечения системы синхронизации ГЛОНАСС имеет следующие точностные характеристики:

- относительная погрешность частоты не более  $\pm 1,0 \cdot 10^{-13}$ ;
- среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты при интервале времени измерений 1 сут не более  $1,0 \cdot 10^{-14}$ ;
- погрешность измерения интервалов времени не более  $\pm 0,1$  нс;
- погрешность определения смещения шкал времени ГЭВЧ и территориально разнесенных объектов не более  $\pm 2$  нс;
- погрешность определения нестабильности частоты (СКДО) бортовых синхронизирующих устройств навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС в процессе штатной эксплуатации не более  $1,0 \cdot 10^{-14}$  (интервал времени измерения 1 сут).

КСМО СС включает в свой состав эталон–переносчик (ЭП) единиц времени и частоты (транспортируемый эталон специальной конструкции), предназначенный для поверки (калибровки) средств измерений на местах их эксплуатации.

В состав эталона–переносчика единиц времени и частоты входят:

- стандарт частоты и времени водородный Ч1–76А;
- компаратор частотный VCH–314;
- частотомер электронно–счетный CNT–90;
- осциллограф цифровой SDA 18000;
- перевозимый приемник сигналов КНС ГЛОНАСС/GPS TTS–3;
- мобильная лаборатория МЛ–2.

Метрологические характеристики ЭП в части передачи размера единиц времени и частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) и сличению шкал времени территориально удаленных наземных объектов определяются метрологическими характеристиками средств, входящих в состав ЭП. Мобильная лаборатория ЭП обеспечивает транспортировку средств измерений на расстояние не менее 2 000 км при времени автономной работы не менее 72 ч.

Комплекс средств передачи единиц времени, частоты и шкалы времени средствам измерений системы синхронизации ГЛОНАСС (КАС СС) предназначен для передачи единиц времени и частоты и шкалы времени UTC(SU) от ГЭВЧ средствам измерений времени и частоты системы синхронизации ГЛОНАСС, а также для определения их метрологических характеристик. КАС СС функционально дополняет комплекс средств метрологического обеспечения системы синхронизации ГЛОНАСС. В состав комплекса средств передачи единиц времени, частоты и шкалы времени средствам измерений системы синхронизации ГЛОНАСС входят:

- комплекс дуплексных сравнений шкал времени;
- перевозимые квантовые часы водородные;
- анализатор фазовых шумов.

Перевозимые квантовые часы водородные ПКЧВ-М предназначены для сравнения шкал времени территориально разнесенных эталонов времени и частоты. ПКЧВ-М представляет собой активный водородный стандарт частоты, в котором по сигналу квантового водородного генератора посредством системы фазовой автоподстройки частоты подстраивается частота кварцевого генератора, из которой затем формируется шкала времени. ПКЧВ-М могут быть также использованы в качестве источника высокостабильных сигналов с частотами 1 Гц, 5, 10 и 100 МГц и для хранения шкалы времени.

Измерение уровня фазовых шумов и нестабильности выходных сигналов стандартов частоты из состава системы синхронизации ГЛОНАСС обеспечивается анализатором фазовых шумов и девиации Алана TSC 5120A.

Комплекс дуплексных сравнений шкал времени КДСШВ состоит из стационарного комплекта аппаратуры дуплексных сравнений шкал времени и перевозимого комплекта аппаратуры дуплексных сравнений шкал времени [3, 4]. Он предназначен для высокоточного сравнения шкал времени пространственно разнесенных эталонов единиц времени и частоты по спутниковым каналам связи.

Стационарный комплект аппаратуры дуплексных сравнений шкал времени размещается на Государственном первичном эталоне единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012. Перевозимый комплект аппаратуры дуплексных сравнений шкал времени

транспортируется к местам эксплуатации средств измерений времени и частоты системы ГЛОНАСС с целью их метрологического обеспечения.

С целью уменьшения погрешности сравнения шкалы времени UTC(SU) со шкалами времени лабораторий Евроазиатской рабочей группы, участвующих в сличениях национальных шкал времени с применением канала космической двусторонней (дуплексной) связи TWSTFT, в 2012 году был разработан комплекс аппаратуры дуплексных сравнений шкал времени.

В 2012 году специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» и Федерального физико-технического учреждения (РТВ) Германии проведены сравнения шкал времени UTC(РТВ) и UTC(SU). Сравнение шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) проводилось тремя независимыми методами:

- с помощью стационарного и мобильного комплексов космической дуплексной аппаратуры связи TWSTFT,
- с помощью перевозимого калибровочного приемника сигналов КНС,
- с помощью перевозимых квантовых часов.

Проведённые мероприятия по калибровке комплекса аппаратуры дуплексных сличений шкал времени из состава ГЭВЧ позволили перейти на качественно новый канал сличений национальной шкалы времени UTC(SU) со шкалой Всемирного координированного времени UTC и улучшить его точностные характеристики почти в пять раз. В течение 2013 года основным каналом сличений были дифференциальные сравнения с использованием сигналов космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. С 29 сентября 2013 года сравнения UTC(SU) с UTC официально проводились по новому дуплексному каналу TWSTFT, которому были приписаны следующие стандартные неопределенности измерений  $u_A < 0,5$  нс и  $u_B < 1,1$  нс.

В настоящее время достигнутые характеристики средств формирования национальной шкалы времени UTC(SU) соответствуют мировому уровню развития средств измерений времени и частоты и при этом обеспечивается согласование национальной шкалы времени UTC(SU) с Международной шкалой координированного времени UTC в пределах  $\pm 10$  нс. Оценки, полученные на основе официальных результатов МБМВ, подтверждают, что национальная шкала времени UTC(SU) входит в число лучших по характеристикам реализаций Международной шкалы координированного времени UTC (рис. 1).

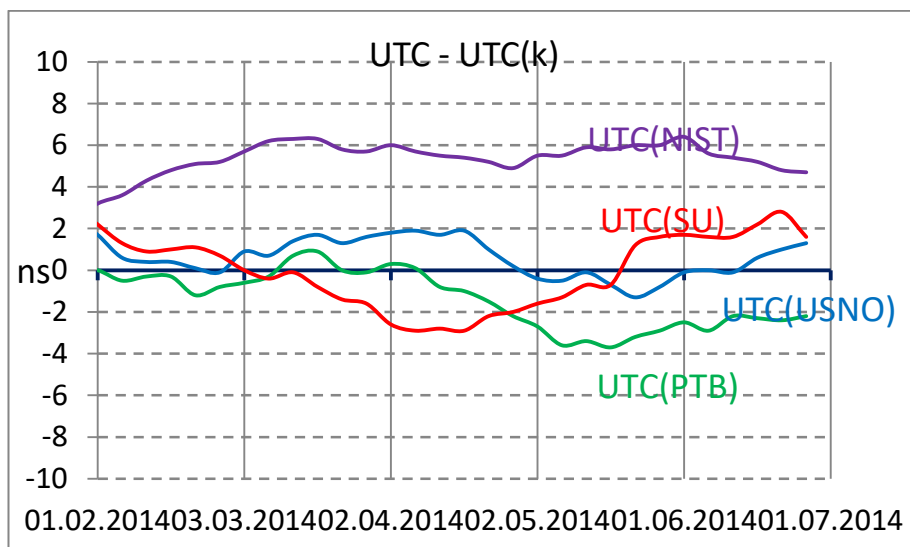


Рис.1. Характеристики формирования шкал времени в 2014 году

Дальнейшее развитие системы ГЛОНАСС осуществляется в соответствии с Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012-2020 годы. Целью программы является расширение внедрения и использования отечественных спутниковых навигационных технологий и услуг системы ГЛОНАСС в интересах специальных и гражданских потребителей, международного использования российских технологий спутниковой навигации за счет поддержания и развития системы ГЛОНАСС. Основными задачами программы являются:

- поддержание системы ГЛОНАСС с гарантированными характеристиками навигационного поля на конкурентоспособном уровне;
- развитие системы ГЛОНАСС в направлении улучшения ее тактико-технических характеристик с целью обеспечения ее паритета с зарубежными системами, лидирующих позиций Российской Федерации в области спутниковой навигации;
- обеспечение использования системы ГЛОНАСС, как на территории Российской Федерации, так и за рубежом.

С целью достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС запланировано совершенствование комплекса средств фундаментального обеспечения системы для решения задач:

- определения времени потребителя в системной шкале времени за счет космического сегмента;



– согласования системной шкалы времени с национальной шкалой времени UTC (SU);

– согласования национальной шкалы времени UTC (SU) с Международной шкалой координированного времени UTC.

В Федеральной целевой программе «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012-2020 годы ГЛОНАСС до 2020 предусмотрено выполнение следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по дальнейшему совершенствованию средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC(SU):

модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени для обеспечения согласования национальной шкалы времени UTC(SU) с UTC с погрешностью не более  $\pm 3$  нс,

разработка высокоточных средств сравнений национальной шкалы времени UTC(SU) со шкалой времени системы ГЛОНАСС и другими эталонами времени и частоты,

создание хранителя единиц времени и частоты на основе фонтана атомов рубидия с нестабильностью  $(1 - 2) \times 10^{-16}$  для оснащения эталонов единиц времени и частоты;

разработка оптических стандартов частоты с неисключенной систематической погрешностью не более  $1 \times 10^{-16}$ ,

создание высокоточного канала передачи эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптической линии связи.

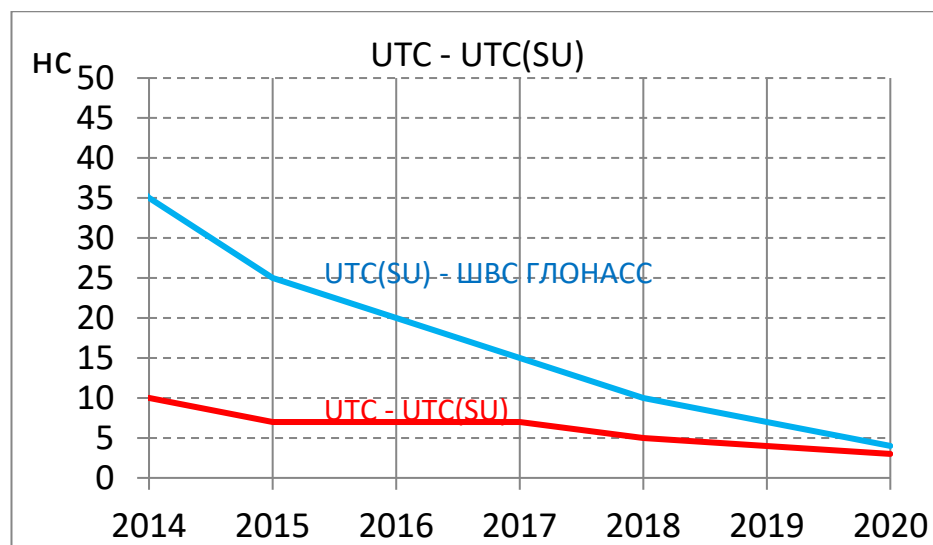


Рис. 2 – Прогнозируемые характеристики формирования и передачи национальной шкалы времени в систему ГЛОНАСС

Планируемые до 2020 года характеристики формирования и передачи национальной шкалы времени UTC(SU) представлены на рис. 2. При этом предполагается, что точность формирования национальной шкалы времени повысится не менее, чем в 3 раза, а точность передачи национальной шкалы времени в систему ГЛОНАСС повысится не менее, чем в 8 раз.

Таким образом, модернизация комплекса средств формирования национальной шкалы времени UTC(SU), основой которых являются технические средства ГСВЧ, направлена на обеспечение конкурентоспособного развития ГЛОНАСС в соответствии с заданными ТТХ и целевыми показателями.

### Литература

1. Норец И.Б., Блинов И.Ю., Домнин Ю.С., Костромин В.П., Нестулей В.И., Пушкин С.Б., Смирнов Ю.Ф. Новая стратегия реализации национальной шкалы времени UTC(SU) // Доклады 6 симпозиума «Метрология времени и пространства» - Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. - С. 74 – 80.
2. Наумов А.В, Игнатенко И.Ю., Каган С.Н., Норец И.Б., Смирнов Ю.Ф. Формирование и передача национальной шкалы времени в КНС ГЛОНАСС // Доклады 6 симпозиума «Метрология времени и пространства» - Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013 - С. 222 –228.
3. Смирнов Ю.Ф., Норец И.Б., Наумов А.В. Реализация метода TWSTFT в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – вып. 23. - С. 389 – 391.
4. Смирнов Ю.Ф., Капитонов А.Л., Лузгин Д.В, Наумов А.В., Результаты исследований комплекса дуплексных сравнений шкал времени ФГУП «ВНИИФТРИ» // Доклады 6 симпозиума «Метрология времени и пространства» - Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013 - С. 119 –125.