



УДК 621.396

**П. П. Богданов, В. Е. Дружин, О. Е. Нечаева,
А. Е. Тюляков, А. Ю. Феоктистов, К. Г. Шупен**

*ОАО «Российский институт радионавигации и времени»
г. Санкт-Петербург, Россия*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Работа посвящена вопросам организации частотно-временного обеспечения (ЧВО) глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС. Рассмотрены основные задачи ЧВО ГНСС ГЛОНАСС, приведено краткое описание реализованной в настоящее время в центре управления системой ГЛОНАСС технологии ЧВО, представлены основные результаты анализа функционирования комплекса технических и программных средств ЧВО, достигнутые точностные характеристики ЧВО и основные направления их совершенствования.

Ключевые слова: навигационная спутниковая система, ГЛОНАСС.

**P. P. Bogdanov, V. E. Druzhin, O. E. Nechaeva,
A. E. Tyuljakov, A. Y. Feoktistov, K. G. Shupen**

*JSC «Russian Institute of Radionavigation and Time»,
Saint-Petersburg, Russia*

IMPROVING OF THE TIME-FREQUENCY SUPPORT FOR GLONASS

The paper presents the frequency/time support (FTS) of Global Navigation Satellite System (GNSS) GLONASS. The basic functions of GNSS GLONASS FTS are given, the FTS technology realized nowadays in GLONASS System Control Center is briefly described, the analysis of FTS hardware/software complex operation and its results are introduced, FTS accuracy characteristics and the main ways of their improvement are presented.

Key words: global navigation satellite system, GLONASS.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС предназначена для высокоточного координатно-временного и навигационного обеспечения морских, воздушных, сухопутных и других видов потребителей.

Для достижения этого в системе реализуется синхронизация бортовых шкал времени (БШВ) всех космических аппаратов (КА) ГНСС относительно шкалы времени системы (ШВС) и синхронизации ШВС относительно принятой опорной шкалы времени (ШВ).

Данные задачи решаются в ГНСС ГЛОНАСС отдельным комплексом технических и программных средств, получившим название системы синхронизации или частотно-временного обеспечения (ЧВО).

Система синхронизации ГНСС ГЛОНАСС совместно со средствами наземного комплекса управления (НКУ) и другими привлекаемыми средствами и комплексами реализует решение следующих основных задач ЧВО [1]:

- формирование и хранение шкалы времени системы (ШВС) ГЛОНАСС;

- определение и прогнозирование расхождений бортовых шкал времени (БШВ) КА

- относительно ШВС, формирование для закладки на борт КА частотно-временных поправок (ЧВП) или исходных данных (ИД) для их размножения на борту КА;
- определение и прогнозирование расхождения ШВС относительно опорной ШВ, формирование для закладки на борт КА соответствующих поправок или ИД для их размножения на борту КА;
- определение и прогнозирование взаимного расхождения ШВС ГЛОНАСС и системы «Навстар» (GPS), формирование для закладки на борт КА соответствующих поправок или ИД для их размножения на борту КА.

В работе представлены основные результаты анализа существующей технологии ЧВО ГНСС ГЛОНАСС, приведены достигнутые точностные характеристики (ТХ), рассмотрены основные направления совершенствования ЧВО ГНСС ГЛОНАСС.

Технология ЧВО ГНСС ГЛОНАСС

Решение целевых задач ЧВО ГНСС ГЛОНАСС в настоящее время достигается с использованием следующей технологии, представленной на рис. 1.

Технология предусматривает выполнение четырех основных технологических циклов (ТЦ): формирование ШВС ГЛОНАСС

(ТЦ ШВС), расчет и формирование ЧВП (ТЦ ЧВП), расчет и формирование поправок к ШВС ГЛОНАСС относительно опорной ШВ (ТЦ ТАУС), расчет и формирование поправок к ШВС ГЛОНАСС относительно ШВ системы «Навстар» (ШВ GPS) (ТЦ TGPS).

Формирование ШВС ГЛОНАСС осуществляется в виде непрерывной ШВ на основе ШВ модернизированного центрального синхронизатора ГЛОНАСС (ЦС-М). При этом используются результаты определения расхождения ШВ ЦС-М относительно опорной ШВ и информация о проведенных операциях управления работой ЦС-М.

Опорной ШВ для ГНСС ГЛОНАСС является национальная координированная шкала времени России UTC(SU), формируемая Государственным эталоном времени и частоты (ГЭВЧ). Расхождение ШВС ГЛОНАСС относительно UTC(SU) не должно превышать 1 мкс.

Для обеспечения требования по поддержанию расхождения БШВ КА относительно шкалы ГЭВЧ в заданных пределах не более 1 мс осуществляется начальная установка БШВ КА после его запуска, а затем контроль БШВ КА и при необходимости проведение операций фазирования, сверки и коррекции БШВ КА с помощью командно-измерительных систем (КИС) или закладочно-измерительных станций (ЗИС).

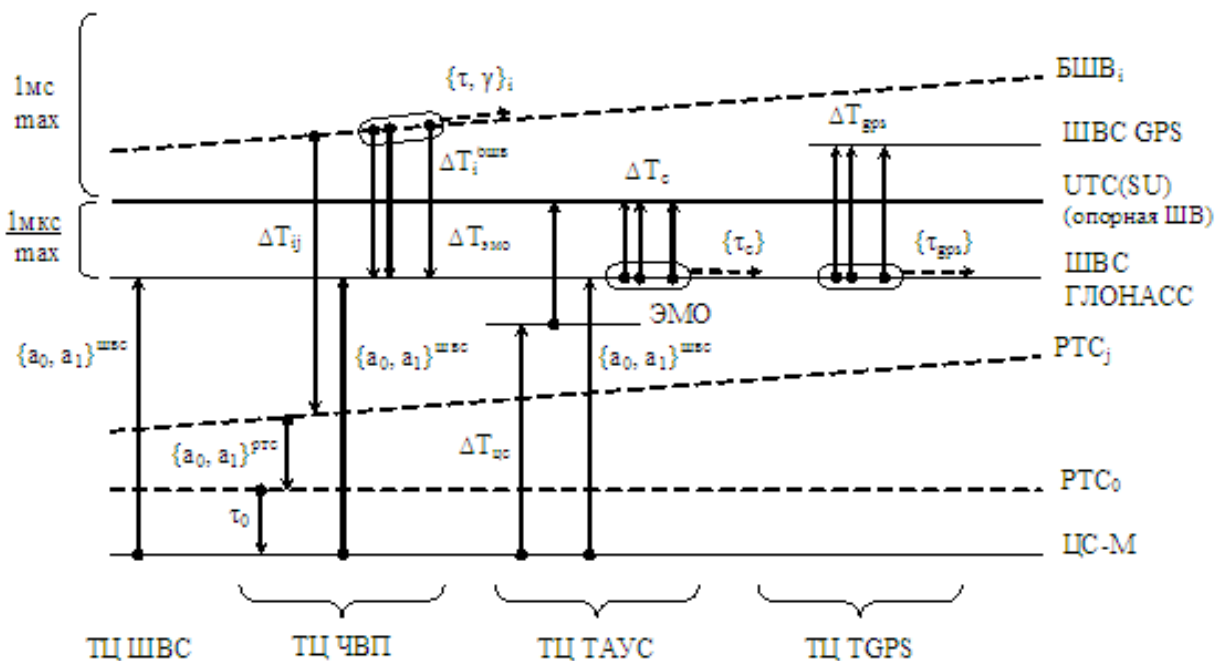


Рис. 1

При коррекции UTC(SU) на плюс или минус 1 с производится соответствующая коррекция ШВ ЦС-М и БШВ всех КА.

Для привязки БШВ КА к ШВС ГЛОНАСС с наносекундной точностью обеспечиваются:

- определение сеансных значений расхождения БШВ КА относительно ШВ измерительных средств НКУ (ΔT_{ij}) и преобразование полученных результатов к значениям расхождения БШВ КА относительно ШВС ГЛОНАСС ($\Delta T_i^{\text{бшв}}$);
- совместная обработка сеансных значений расхождения БШВ КА относительно ШВС ГЛОНАСС на заданном интервале наблюдения для оценивания параметров ухода БШВ КА и его прогнозирования на заданный интервал времени;
- формирование ЧВП или ИД для размножения ЧВП на борту КА.

Определение расхождения БШВ КА относительно ШВ измерительных средств НКУ осуществляется по синхронным измерениям беззапросной дальности беззапросных измерительно-вычислительных систем (БИВС) и запросной дальности ЗИС (запросно-беззапросная технология) или по измерениям беззапросной дальности БИВС, беззапросных измерительных систем (БИС) и беззапросных измерительных средств из состава квантово-оптических систем (БИС КОС) и расчетным значениям дальности (беззапросная технология).

Преобразование значений расхождения БШВ КА относительно ШВ измерительных средств НКУ к значениям расхождения БШВ КА относительно ШВС ГЛОНАСС осуществляется путем последовательного учета параметров привязки ШВ измерительных средств к ШВ опорного измерительного средства ($\{a_0, a_1\}^{\text{рпс}}$), ШВ опорного измерительного средства к ШВ ЦС-М (τ_0) и ШВ ЦС-М к ШВС ГЛОНАСС ($\{a_0, a_1\}^{\text{швс}}$) на моменты сеансов измерений.

Оценивание параметров ухода БШВ КА относительно ШВС ГЛОНАСС осуществляется с использованием алгоритма обработки сеансных результатов определения расхождения ШВ на основе метода наименьших квадратов (МНК).

Расчет и последующая закладка информации о ЧВП на КА выполняются на каждом витке.

Для формирования и последующей закладки на КА информации о расхождении

ШВС ГЛОНАСС относительно шкалы ГЭВЧ обеспечиваются:

- определение сеансных значений расхождения ШВ ЦС-М относительно шкалы ГЭВЧ и преобразование полученных результатов к значениям расхождения ШВС ГЛОНАСС относительно шкалы ГЭВЧ ($\Delta T_{\text{с}}$);
- совместная обработка сеансных значений расхождения ШВС на заданном интервале наблюдения для оценивания параметров ухода ШВС ГЛОНАСС и его прогнозирования на заданный интервал времени;
- формирование поправок к ШВС ГЛОНАСС относительно шкалы ГЭВЧ или ИД для их размножения на борту КА.

Определение расхождения ШВ ЦС-М относительно шкалы ГЭВЧ осуществляется по информации из автоматизированного центра управления системой «Цель» (АЦУС), включающей значения расхождения ШВ ЦС-М и эталона министерства обороны (ЭМО) ($\Delta T_{\text{с}}$), полученных на основе обработки одновременных измерений аппаратуры привязки (АП) по сигналам КА ГЛОНАСС и GPS на ЦС-М и в АЦУС, и расхождения шкал времени ЭМО и ГЭВЧ ($\Delta T_{\text{эмо}}$).

Расчет и последующая закладка на борт КА информации о поправках к ШВС ГЛОНАСС выполняется раз в сутки.

Для формирования и последующей закладки на КА информации о расхождении системной ШВ GPS относительно ШВС ГЛОНАСС обеспечиваются:

- определение сеансных значений расхождения системной ШВ GPS и ШВС ГЛОНАСС;
- совместная обработка сеансных значений расхождения системной ШВ GPS относительно ШВС ГЛОНАСС на заданном интервале наблюдения для оценивания параметров расхождения ШВ и его прогнозирования на заданном интервале времени;
- формирование поправок к системной ШВ GPS относительно ШВС ГЛОНАСС или ИД для их размножения на борту КА.

Определение расхождения ШВС ГЛОНАСС и системной ШВ GPS (ΔT_{gps}) осуществляется также в АЦУС на основе измерений АП по сигналам КА ГЛОНАСС и GPS.

Расчет и последующая закладка поправок к системной ШВ GPS выполняется раз в сутки.

Расчет и формирование всех видов ЧВИ, закладываемой на борт КА, осуществляется с помощью комплекса программ (КП) ЧВО

на вычислительных средствах центра управления системой ГЛОНАСС (ЦУС-У) в соответствии с планами закладки специальной информации (СИ).

Сформированные массивы СИ передаются на один из пунктов для закладки на КА с помощью КИС или ЗИС.

Заложенная информация обрабатывается на борту КА и излучается в составе цифровой информации навигационных радиосигналов.

Анализ точностных характеристик ЧВО ГНСС ГЛОНАСС

В настоящее время орбитальная группировка (ОГ) КА ГНСС ГЛОНАСС состоит из КА «Глонасс-М», находящихся в штатной эксплуатации, и одного КА «Глонасс-К», проходящего этап летных испытаний.

На борту КА «Глонасс-М» установлены бортовые синхронизирующие устройства (БСУ) на основе трех квантовых стандартов частоты на атомно-лучевой рубке (КСЧ-АЛТ) с суточной нестабильностью не более $1 \cdot 10^{-13}$, один из которых является рабочим, а два других находятся в «холодном» резерве. Оценка ТХ всех рабочих стандартов частоты на КА «Глонасс-М» в период их эксплуатации показывает, что для большинства генераторов на интервалах их штатной работы относительная погрешность по частоте находится в пределах $\pm 2 \cdot 10^{-12}$, среднее квадратическое относительное отклонение (СКОО) частоты при времени измерения 1 сутки не превышает $(6-8) \cdot 10^{-14}$, а систематическое изменение частоты (дрейф) не наблюдается или не превышает нескольких единиц на 10^{-13} за месяц.

На борту КА «Глонасс-К» устанавливаются БСУ на основе двух КСЧ-АЛТ и двух квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ-РГЯ) с суточной нестабильностью также не более $1 \cdot 10^{-13}$. После включения БСУ одновременно включаются один КСЧ-АЛТ (в качестве рабочего) и один КСЧ-РГЯ, частота которого корректируется относительно частоты КСЧ-АЛТ. После установления прогнозируемого дрейфа частоты КСЧ-РГЯ производится отключение КСЧ-АЛТ и в качестве рабочего генератора БСУ используется КСЧ-РГЯ. При отказе КСЧ-РГЯ он отключается и производится включение КСЧ-АЛТ и резервного КСЧ-РГЯ, при необходимости алгоритм работы повторяется. При

отказе обоих КСЧ-РГЯ БСУ функционирует, используя оставшийся ресурс КСЧ-АЛТ.

В составе ЦС-М используется групповой водородный хранитель частоты и времени (ГВХЧВ), включающий четыре водородных стандарта частоты (ВСЧ) с суточной нестабильностью частоты не более $2 \cdot 10^{-15}$. Относительное отклонение частоты ЦС-М поддерживается в пределах $\pm 3 \cdot 10^{-14}$.

В настоящее время определение расхождения БШВ КА осуществляется только по беззапросной технологии. Погрешность определения расхождения БШВ КА при штатном функционировании беззапросных измерительных средств НКУ находится в пределах 2,3–3,4 нс (σ).

Погрешность определения расхождения ШВС ГЛОНАСС относительно шкалы ГЭВЧ по информации из АЦУС «Цель» не превышает 3,5 нс (σ), погрешность определения расхождения системной ШВ GPS и ШВС ГЛОНАСС – 8,0 нс (σ).

При штатном функционировании всех средств ГНСС ГЛОНАСС погрешность расчета и формирования ЧВП находится на уровне 3,0–6,0 нс (σ) в зависимости от точностных характеристик БСУ КА, погрешность расчета и формирования поправок к ШВС ГЛОНАСС не превышает 15 нс (σ), погрешность расчета и формирования поправок к системной ШВ GPS – 10 нс (σ).

В то же время в поправках к ШВС ГЛОНАСС в настоящее время существует систематическая ошибка порядка 200 нс, обусловленная нештатным изменением внутренней задержки сигналов в опорном измерительном средстве после проведения ремонтно-восстановительных работ в 2010 году.

Основные направления совершенствования ЧВО и пути их реализации

Совершенствование ЧВО ГНСС ГЛОНАСС должно достигаться за счет:

- создания, модернизации и привлечения новых средств и систем, повышения их точностных характеристик;
- совершенствования методик и алгоритмов обработки информации;
- совершенствования технологических циклов расчета и формирования ЧВИ;
- повышения характеристик надежности и отказоустойчивости.

Совершенствование ТХ средств, используемых для ЧВО, должно осуществляться по следующим основным направлениям:

- повышение стабильности частоты бортовых генераторов КА до уровня $1 \cdot 10^{-14}$ и лучше;
- повышение стабильности частоты ЦС-М до уровня $(0,5-1,0) \cdot 10^{-15}$;
- повышение точности наземных измерительных средств до уровня, обеспечивающего определение расхождения БШВ КА с погрешностью не более 0,5 нс;
- обеспечение высокоточной калибровки внутренних задержек сигналов измерительных средств НКУ и привлекаемых средств, а также каналов командно-измерительной системы КА;
- расширение состава измерительных средств НКУ, в том числе вне территории России.

Совершенствование методик и алгоритмов обработки информации предполагается осуществлять по следующим основным направлениям:

- модернизация алгоритмов предварительной обработки информации и определения расхождения БШВ КА, в том числе на основе:
 - внедрения кодово-фазовых и разностных технологий;
 - использования измерительной информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений (БАМИ);
 - использования информации системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП);
- совершенствование алгоритмов прогнозирования расхождения БШВ КА;
- совершенствование методик и алгоритмов сведения ШВ объектов системы.

Совершенствование ТЦ расчета и формирования ЧВИ предполагает реализацию следующих направлений:

- согласование ТЦ ЧВО и ТЦ баллистико-эфемеридного обеспечения (БЭО) в части минимизации ошибок прогнозирования эфемеридной информации (ЭИ), используемой при расчете ЧВП;
- увеличение количества закладок ЧВП на борт КА с целью минимизации ошибок прогнозирования ЧВП за счет старения информации;

- привлечение измерительной информации БАМИ и измерительных средств глобальных сетей для обеспечения наблюдаемости всей орбиты КА.

В части повышения характеристик надежности и отказоустойчивости для обеспечения непрерывности ЧВО предполагается реализация следующих основных направлений:

- обеспечение резервирования элементов системы, в том числе ввод резервных ЦС-М;
- внедрение современных аппаратно-программных средств на основе отказоустойчивых технологий;
- устранение скачков ШВ измерительных средств, опорных ШВ на пунктах их размещения;
- повышение оперативности и надежности информационно-логического взаимодействия между элементами системы, системой и другими привлекаемыми средствами.

Результаты испытаний и эксплуатации ГНСС ГЛОНАСС показывают, что при штатном функционировании всех средств ТХ ЧВО в основном соответствуют этапу 2 тактико-технических требований (ТТТ) к ГНСС ГЛОНАСС.

Достижение ТХ ЧВО 3-го этапа ТТТ к ГНСС ГЛОНАСС связано с повышением точностных и эксплуатационных характеристик всех средств системы, расширением сети измерительных средств НКУ, совершенствованием методик и алгоритмов обработки измерительной информации, определения и прогнозирования расхождения БШВ КА, совершенствования ТЦУ расчета и формирования ЧВИ, а также с привлечением для ЧВО информации СВОЭВП и использованием межспутниковых измерений.

Библиографические ссылки

1. Басевич А. Б., Богданов П. П., Белов Л. Я., Дружин В. Е., Новиков Н. Н., Стяжкин А. Д., Тюляков А. Е. Система синхронизации ГНСС ГЛОНАСС: Современное состояние и перспективы // Тр. института прикладной астрономии РАН. Вып. 13. СПб.: Наука, 2005. С. 293–300.

*Статья поступила в редакцию
29.05.2013 г.*