

## Формирование шкал времени устройств частотно-временного обеспечения методом структурного анализа

© С.Д. Петров<sup>1</sup>, И.В. Чекунов<sup>2</sup>, В.А. Усачев<sup>3</sup>,  
А.Г. Топорков<sup>3</sup>, В.В. Корянов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> СПбГУ, Санкт-Петербург, 199034, Россия

<sup>2</sup> ЦНПО «Каскад», Москва, 125047, Россия

<sup>3</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Подробно проанализированы существующие современные модели шкал времени. Указаны преимущества разработанной структурной модели шкалы времени. Компенсация погрешности низкочастотных фликкер-шумов осуществлена с применением теории Колмогорова для формирования шкалы времени с помощью математического аппарата структурного анализа. Представлена структурная схема аппаратно-программного бортового хранителя времени и частоты. В качестве основы для построения выходной шкалы времени и опорной частоты выбрана схема из трех квантовых генераторов. Получены результаты работы групповых хранителей времени и частоты в виде невязок шкал генераторов после фильтрации. Использование разработанного метода при создании экспериментальных образцов рабочих стандартов частоты показало, что их достижимая точность и стабильность на 1,5–2 порядка превышают аналогичные характеристики существующих промышленных изделий.*

**Ключевые слова:** шкала времени, групповой стандарт времени и частоты, ГЛОНАСС, частотно-временное обеспечение, задержка сигнала, космический аппарат, GPS

**Введение.** Эффективное функционирование современных телекоммуникационных и информационных компьютерных сетей невозможно без высококачественной частотной и временной синхронизации. Используемые в настоящее время способы доставки сигналов синхронизации к элементам сети в составе информационных пакетов порождают ряд острых проблем, связанных с появлением неуправляемой девиации задержек синхросигналов в процессе доставки к сетевым узлам. Вследствие таких задержек появляются дополнительные шумы и искажения в передаваемых пакетных сигналах, что в крайнем случае может привести к развалу информационных пакетов.

Рассинхронизация бортовых систем с наземными измерительными средствами полностью обусловлена используемым методом асинхронного пакетного информационного обмена, остро реагирующего на степень загруженности физического канала связи.

Наличие задержки бортовой шкалы времени (БШВ) относительно шкалы времени Государственного эталона частоты и времени России

UTC(SU) позволяет выдвинуть гипотезу о сильной загруженности каналов борта во время старта, что и вызывает задержку синхросигналов в протоколе RS-485.

Навигационные измерения по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС) во время пуска ракеты-носителя (РН) невозможны из-за слишком большого интервала времени корреляционного поиска и интегрирования по периоду времени задержки навигационных сигналов относительно шкалы времени РН. Соответственно, недостижимо решение навигационных задач по определению местоположения космического аппарата (КА), вектора скорости и привязки систем координат для РН, разгонного блока, КА по сигналам СРНС без синхронизации работы с инерциальной системой навигации в локальной шкале времени.

Наличие высокоточной стабильной БШВ [1, 2] является основой оперативности, точности, надежности решения задач навигации в полном объеме. Бортовая шкала времени должна обеспечивать выполнение следующих функций:

- формирование стабильной частоты для гетеродинирования входного сигнала;
- формирование меток времени для систем регистрации;
- хранение точного времени для синхронных измерений по огибающей;
- устранение фазовой неоднозначности несущей для обеспечения когерентных измерений по огибающей;
- проверка достоверности навигационных сигналов.

Эти функции особо актуальны при существующей организационной структуре СРНС ГЛОНАСС, в которой отсутствуют штатные средства функционирования в условиях радиоэлектронной борьбы, в отличие от СРНС GPS, обеспеченной штатными системами Selective availability и Anti-spoofing.

Высокоточная БШВ обеспечивает проверку достоверности навигационных сигналов, «горячий старт» навигационной аппаратуры потребителя (НАП) и снижение пределов интегрирования временных периодов при решении навигационной задачи.

Актуальнейшей задачей является формирование собственной прецизионной бортовой шкалой хранения времени КА, что позволит обеспечить достоверность принимаемых им навигационных сигналов.

Цель данной работы — используя математический аппарат структурного анализа, сформировать модель шкалы времени с применением теории Колмогорова. На базе разработанной модели провести моделирование работы блока хранения времени и частоты.

**Особенности математической модели.** Применяемые в качестве источника опорных сигналов кварцевые генераторы [3] имеют относительную нестабильность  $\sigma$  около  $10^{-6}$  на периоде 24 ч.

Сравнительные характеристики глобальных систем, которые основываются на частотно-временном обеспечении, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Глобальные распределенные системы с частотно-временным обеспечением**

Система	Стабильность опорного генератора КА	Стабильность центрального синхронизатора	Невязки между объектами системы, нс	Расхождение БШВ с UTC, мс	Назначение
ГЛОНАСС [4]	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-15}$	20	1	Навигация
GPS	$5 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-15}$	20	1	- / -
DORIS [5]	$10^{-11}$	$10^{-14}$	3	Нет свед.	Геодезия
РСДБ [6]	$10^{-14}$	$10^{-14}$	1	- / -	Определение параметров вращения Земли

Уход фазы сигнала за 1 с составляет 1 мкс, что не обеспечивает выполнение требуемых от БШВ функций.

Для обеспечения стабильности фазы при формировании высокоточных шкал времени непосредственно на борту космических средств предлагается использовать принцип аппаратно-программной компенсации погрешностей сигналов опорных генераторов при создании бортовых хранителей времени и частоты (БХВЧ).

Аппаратно-программный принцип компенсации погрешностей при формировании шкалы времени заключается в построении и реализации математической модели шкалы времени, учитывающей детерминированные погрешности аппаратуры, аппаратурно определяемые погрешности воздействия внешней среды и случайные, т. е. шумовые, погрешности. Математическая модель шкалы времени определяется как временная зависимость суммарной временной поправки, вводимой в циклограмму функционирования на определенных тактах внутренней синхронизации системы.

В классическом случае при формировании шкал времени системы (ШВС) в СРНС ГЛОНАСС и GPS используются полиномы первого и второго порядка, обеспечивающие компенсацию только детерминированных аппаратных погрешностей.

Рассмотрим более подробно существующие современные модели шкал времени.

**Модель шкалы времени СРНС ГЛОНАСС.** Особенностью данной модели шкалы времени навигационного КА (НКА) ГЛОНАСС является то, что она задается в виде линейной функции времени

$$\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + w,$$

где  $\Delta T_i$  — поправка к шкале времени бортового стандарта времени и частоты НКА;  $A_0$  и  $A_1$  — безразмерные коэффициенты модели шкалы времени;  $t$  — эфемеридное время;  $t_0$  — эпоха задания бортовых эфемерид;  $w$  — аддитивный белый шум.

**Модель шкалы времени СРНС GPS.** Модель шкалы времени НКА GPS задается в виде квадратичной функции времени

$$\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + A_2(t - t_0)^2 + w,$$

где  $A_2$  — безразмерный коэффициент модели шкалы времени.

**Модель шкалы времени ВКА.** Аналитическая модель шкалы времени, предложенная Военно-космической академией им. А.Ф. Можайского (ВКА), задается как линейная функция времени квазигармонической составляющей:

$$\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + C \cos(\omega t + \varphi) + w,$$

где  $C$  — безразмерный коэффициент модели шкалы времени;  $\omega$  и  $\varphi$  — частота и фаза квазигармонической составляющей модели шкалы времени.

**Модель шкалы времени МБМВ.** Модель шкалы времени Международного бюро мер и весов (МБМВ), а также Военно-морской обсерватории США (USNO) задается посредством взвешенного группирования шкал времени стандартов времени и частоты:

$$\Delta T = \sum_1^N W_i \Delta T_i \text{GPS} + \int \frac{df}{f},$$

где  $W_i$  и  $\Delta T_i$  — веса и шкалы времени индивидуальных стандартов времени и частоты.

Веса стандартов назначаются в соответствии с их дисперсиями Аллана относительно групповой шкалы  $\Delta T$ .

**Структурная модель шкалы времени.** Структурная модель создается на основе структурного анализа [7] результатов сличений данной шкалы времени с эталоном в сочетании с моделью температурной компенсации опорного генератора (ОГ), формирующего данную шкалу времени. В результате исследований ряда квантовых и кварцевых генераторов установлено, что фаза опорного сигнала для основ-

ных типов генераторов является случайным процессом со стационарными приращениями третьего порядка, поэтому модель температурой компенсации задается квадратичным полиномом относительно абсолютной температуры генератора.

Структурная модель шкалы времени имеет вид

$$\Delta T = \sum_1^N W_i \Delta T_i,$$

а модель индивидуальной шкалы времени — вид

$$\Delta T_i = A_0 + A_1(t-t_0) + A_2(t-t_0)^2 + C_1(t-t_0) + C_2(t-t_0)^2 + N(t),$$

где  $A_j$  ( $j=0, 1, 2$ ) — безразмерные структурные коэффициенты модели шкал времени;  $C_1$  и  $C_2$  — температурные коэффициенты;  $t$  — абсолютная температура;  $N(t)$  — цветной шум с дробным показателем степени спектральной плотности мощности.

Все коэффициенты структурной модели, кроме  $C_1$  и  $C_2$ , оцениваются по структурным функциям невязок сличений шкал времени с эталонной вплоть до третьего порядка. Температурные коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  определяются посредством калибровки.

Для формирования общего представления о существующих современных моделях шкал времени в табл. 2 представлены сводные данные об этих моделях.

В структурной модели реализована стохастическая рекуррентная модель, комплексно компенсирующая детерминированные, определяемые и случайные (шумовые) погрешности [8].

Наиболее сложной и малоизученной областью является компенсация шумовых погрешностей как причины стохастических частотно-временных флуктуаций сигнала ОГ [9]. В виде моделей реализованы два типа шумов, характеризующих частотные флуктуации:

1) аддитивные, которые не вносят возмущений в петлю обратной связи и суммируются с сигналом ОГ;

2) мультипликативные, которые вносят возмущения в петлю обратной связи и приводят к модуляции частоты ОГ.

Функция изменения фазы задается выражением

$$\varphi(t) = \varphi_0(t)m(t) + n(t),$$

где  $m(t)$  — флуктуации из-за мультипликативных шумов;  $n(t)$  — флуктуации из-за аддитивных шумов.

## Современные модели шкал времени

Модель шкалы времени	Температурная компенсация	Стохастическая часть шкалы времени	Суммирование ОГ	Оценка качества
ГЛОНАСС $\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + w$	Нет	Белый шум	Нет	Нет
GPS $\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + A_2(t - t_0)^2 + w$				
ВКА $\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + C \cos(\omega t + \varphi) + w$				
МБМВ (USNO) $\Delta T = \sum_1^N W_i \Delta T_{iGPS} + \int \frac{df}{f}$	Нет	Фликкер-шум	Есть	Дисперсия Аллана
Структурная третьего порядка $\Delta T = \sum_1^N W_i \Delta T_i$ $\Delta T_i = A_0 + A_1(t - t_0) + A_2(t - t_0)^2 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2 + N(t)$	Есть	Стохастический процесс со стационарным приращением третьего порядка	Есть	Структурная дисперсия

При анализе частотных флуктуаций сигнала ОГ невозможно идентифицировать по физической природе вклад шумов в дисперсию отклонений частоты ОГ.

Аддитивные частотные флуктуации имеют широкий спектр с малой областью низкочастотных флуктуаций.

Мультипликативные шумы (фликкер) характеризуются медленными изменениями частоты (время корреляции более чем  $1^{-10}$  с) и убывающим энергетическим спектром.

Фликкер-шум имеет степенной вид спектра мощности на низких частотах [10]. Спектральная плотность мощности фликкерных флуктуаций [11] представляется в виде

$$S_{\Phi}(w) = \frac{A_{\Phi}}{2\pi} w^{-\gamma},$$

где  $A_{\phi}$  — амплитуда фликкерных флуктуаций;  $w$  — частота;  $\gamma$  — безразмерный коэффициент.

Закон  $w^{-\gamma}$  справедлив для сколь угодно малых частот, при этом:

$\gamma < 1$  — стационарный процесс фликкера;

$\gamma \geq 1$  — нестационарный процесс с неинтегрируемым спектром;

$\gamma > 1$  — нестационарный процесс со стационарными приращениями.

Петля обратной связи фазовой автоподстройки частоты строится таким образом, что основное влияние на случайные флуктуации частоты оказывает низкочастотный, экспериментально обнаруживаемый степенной фликкер-шум с частотой от 1 до  $10^{-7}$  Гц.

Компенсировать погрешность низкочастотных фликкер-шумов путем оптимальной фильтрацией довольно сложно из-за нестационарности процесса. Для организации оптимальной фильтрации необходимо определить корреляционную функцию и оценить фильтрацию дисперсией, однако для нестационарных процессов это невозможно. Данная проблема решается применением теории Колмогорова для формирования шкал времени с помощью аппарата структурного анализа на основе анализа структурных функций.

Структурная функция — неотрицательная функция одной переменной, определяемая как средний квадрат приращений флуктуаций на интервале  $\tau$ :

$$D_x(\tau) = E[x(t+\tau) - x(t)]^2.$$

Гипотезы Колмогорова, изначально созданные в качестве аппарата для использования в статистической гидромеханике, были специально адаптированы для решения задач частотно-временного обеспечения с соответствующей заменой гидромеханических характеристик электромагнитными аналогами. Изложение механизмов адаптации гипотез Колмогорова выходит за рамки настоящей статьи.

**Практическая реализация БХВЧ.** Структурная схема аппаратно-программного БХВЧ представлена на рис. 1.

Основой для построения выходной шкалы времени и опорной частоты выбрана схема из трех квантовых генераторов. В качестве генераторов могут быть использованы любые современные стандарты времени и частоты, удовлетворяющие требованиям поставленной задачи, а именно компактности и паспортной относительной стабильности не ниже чем  $10^{-11}$  в течение 24 ч. Таким требованиям удовлетворяют рубидиевые генераторы FE-5680A производства АО «Морион», которые и были использованы в настоящем проекте. Количество генераторов выбрано таким образом, чтобы обеспечить надежность автономной шкалы времени [12] при выходе из строя од-

ного из генераторов. От генераторов микропроцессорный модуль получает секундный меандр частотой 1 Гц, так называемый PPS (pulse per second).

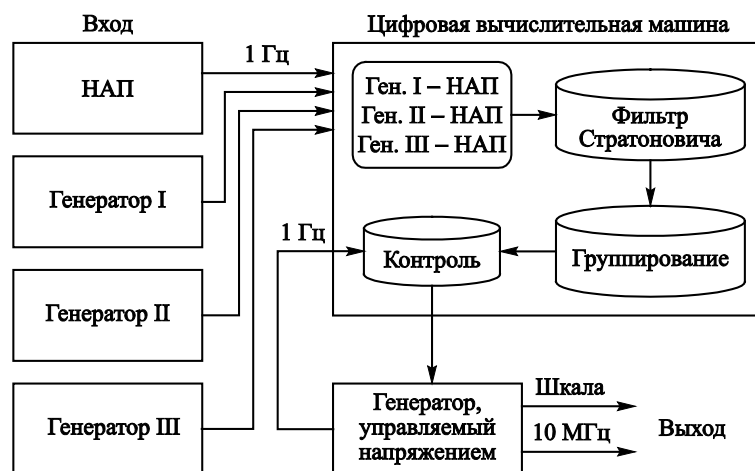


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного БХВЧ

Синхронизация стандарта со шкалой всемирного координированного времени UTC (Coordinated Universal Time), международной шкалой атомного времени TAI (Temps atomique international), шкалами ГЛОНАСС или GPS осуществляется посредством приемника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в модульном исполнении. В качестве приемника целесообразно использовать приемо-измерительный модуль «РТК-Нави» производства КБ «Навис», принимающего сигналы навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. Данный модуль обеспечивает погрешность синхронизации со шкалами UTC, TAI, ГЛОНАСС или GPS не более 20 нс. От ГНСС-приемника микропроцессорный модуль получает метку времени в той или иной шкале, а также секундный меандр частотой 1 Гц.

Моменты положительных импульсов секундных меандров с трех генераторов и с ГНСС-модуля фиксируются по системным часам вычислительного устройства, в памяти которого формируется четыре временных ряда поправок  $t_{Г1}$ ,  $t_{Г2}$ ,  $t_{Г3}$  и  $t_{ГНСС}$  — генераторов I–III и ГНСС соответственно.

Под поправкой ГНСС подразумевается разность показаний системных часов и шкалы UTC. Вместо UTC можно также использовать шкалы TAI, ГЛОНАСС или GPS. Выбор шкалы времени, как правило, регулируется соответствующими настройками ГНСС-приемника.

По мере накопления поправок  $t$  выполняется их математическая обработка. По результатам обработки для каждого генератора в свою очередь строится математическая модель. Математическая модель



позволяет, во-первых, корректировать показания каждого генератора, во-вторых, получать оценку точности хода каждого генератора на текущий момент времени.

По показаниям генераторов и на основе их математических моделей выполняется статистическое осреднение хода каждого генератора с целью формирования объединенной, групповой шкалы времени.

Макет БХВЧ, который реализован по схеме, приведенной на рис. 1, состоит из трех рубидиевых генераторов FE-5680A производства АО «Морион», НАП ГЛОНАСС, вычислительного модуля, а также схемы коммутации и питания (рис. 2).

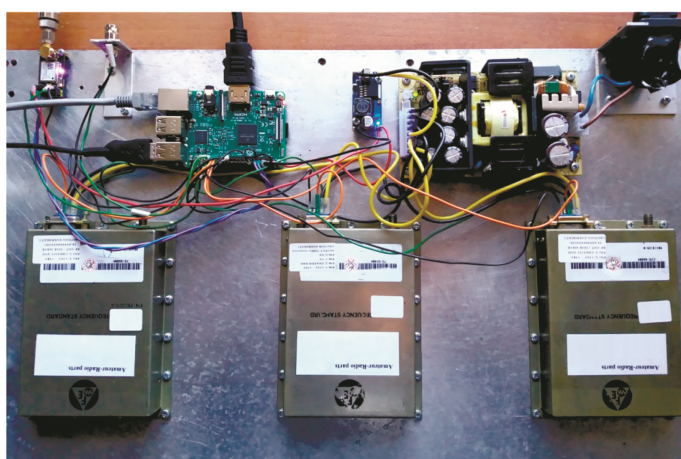


Рис. 2. Действующий прототип БХВЧ

Результаты работы макета БХВЧ в течение суток представлены на рис. 3. Показаны невязки шкал времени индивидуальных генераторов после учета их моделей относительно рабочей шкалы времени. Видно, что в течение суток значения шкал времени для индивидуальных генераторов в результате фильтрации не отличаются от значений рабочей шкалы времен более чем на 50 нс.

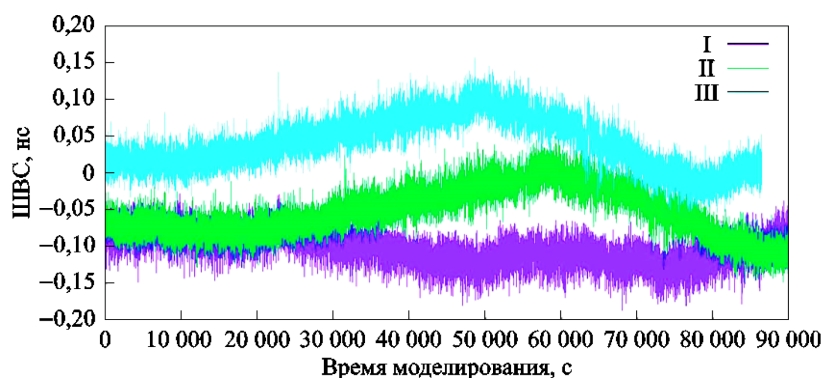
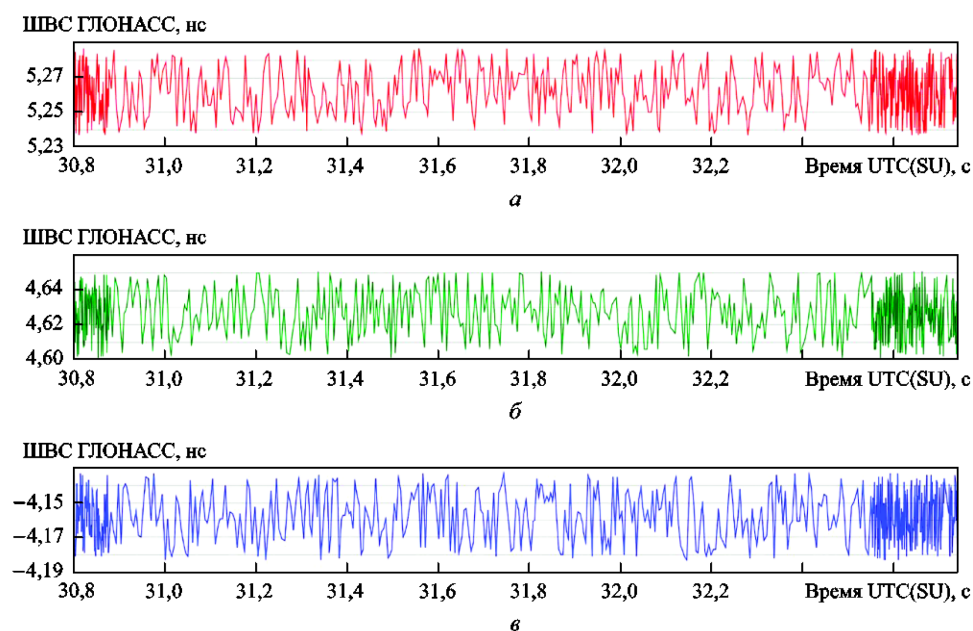


Рис. 3. Невязки шкал генераторов I–III после фильтрации

Результаты работы групповых хранителей времени и частоты, расположенных в разных организациях, приведены на рис. 4.

В режиме реального времени работу БХВЧ (см. рис. 2), а также БХВЧ, расположенных в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) и Институте прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), можно наблюдать в Интернете (<http://vremya.ru.ru>).



**Рис. 4.** Невязки шкал генераторов после фильтрации для атомных групповых хранителей времени и частоты, расположенных в СПбГУ (а), ИПА РАН (б) и ИГиТ им. Н.Э. Баумана (в)

**Заключение.** Практическое использование разработанных методов при создании экспериментальных образцов рабочих стандартов частоты показало, что их достижимая точность и стабильность на 1,5–2 порядка превышает аналогичные характеристики существующих промышленных изделий.

Особенностью рассмотренного аппаратного построения БХВЧ является наличие компьютера, который синтезирует рабочую шкалу времени в соответствии с алгоритмами программного обеспечения из опорной частоты, формируемой высокостабильным генератором.

Для компенсации погрешностей при решении задач частотно-временного обеспечения построена динамическая модель оптимальной фильтрации Стратоновича нестационарных случайных процессов структурными функциями глубиной до третьего приращения стацио-

нажности. При этом применяемые структурные функции являются многофункциональным инструментом решения задач навигации, баллистики, траекторных измерений и частотно-временного обеспечения.

За счет программной обработки поправок достигнута суточная стабильность выходной шкалы на уровне  $5 \cdot 10^{-13}$ , что на порядок выше, чем у индивидуальных генераторов. Необходимо отметить, что дальнейшее развитие математической модели позволит повышать стабильность шкалы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wang B., Lou Y., Liu J., Zhao Q., Su X. Analysis of BDS satellite clocks in orbit. *GPS Solutions*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 783–794. Springer.  
DOI: 10.1007/s10291-015-0488-7
- [2] Shi Ch., Guo Sh., Gu Sh., Yang X., Gong X., Deng Zh., Ge M., Schul H. Multi-GNSS satellite clock estimation constrained with oscillator noise model in existence of data discontinuity. *J. of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 4, pp. 515–528. Research Gate. DOI: 10.1007/s00190-018-1178-3
- [3] Макаренко Б.И. *Кварцевые и квантовые меры частоты*. Москва, Изд-во Министерство обороны СССР, 1976, 413 с.
- [4] Богданов П.П., Дружин В.Е., Нечаева О.Е., Тюляков А.Е., Феоктистов А.Ю., Шупен К.Г. Совершенствование частотно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС. *Исследования Наукограда*, 2013, № 3–4, с. 12–16.
- [5] Кузин С.П., Татевян С.К. Вклад системы DORIS в построение общеземной системы координат (ITRF2013). *Геодезия и картография*, 2015, № 6, с. 2–9.
- [6] Матвеев Л.И. История РСДБ — становление и развитие. *Сообщения ИПА РАН*, 2007, № 176, с. 1–35.
- [7] Петров С.Д., Чекунов И.В. Создание малогабаритных бортовых прецизионных аппаратно-программных хранителей времени и частоты (БХВЧ) на основе структурного анализа. *XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Сб. тезисов. Москва, 24–27 января 2017*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 290, 291.
- [8] Степанов А.В. *Электрические шумы*. Москва, Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 2003, 27 с.
- [9] Беляев А.А., Сахаров Б.А., Козлов А.К., Якимов А.В. Флуктуации частоты водородного стандарта. *Тр. 1-го рабочего совещания по проекту НАТО S/P-973799 Semiconductors «Разработка радиационно-стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа»*. Нижний Новгород, ТАЛАМ, 2001, с. 109–117.
- [10] Подлазов А.В. *Теория самоорганизованной критичности — наука о сложности*.  
URL: <https://mipt.ru/students/organization/mezhpr/arxiv/mezhpred2/podlazov.pdf>  
[http://www.rf.unn.ru/NATO/1ws/S/P\\_Kozlov.pdf](http://www.rf.unn.ru/NATO/1ws/S/P_Kozlov.pdf). (дата обращения 24.05.2019).

- [11] Борисов Б.Д. *Модели спектральной плотности мощности фликкер-шумов*. URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/АИПИ-2-2015-8.pdf> (дата обращения 24.05.2019).
- [12] Петров С.Д., Смирнов С.С., Чекунов И.В., Хегай Д.К. Компактный групповой автономный стандарт времени и частоты. *Тр. Института прикладной астрономии РАН*, 2016, № 36, с. 35–40.

Статья поступила в редакцию 05.07.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петров С.Д., Чекунов И.В., Усачев В.А., Топорков А.Г., Корянов В.В. Формирование шкал времени устройств частотно-временного обеспечения методом структурного анализа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-8-1901>

**Петров Сергей Дмитриевич** — канд. физ.-мат. наук, и.о. заведующего кафедрой астрономии Санкт-Петербургского государственного университета.  
e-mail: petr0v@mail.ru

**Чекунов Илья Владимирович** — главный конструктор ЦНПО «Каскад».  
e-mail: onip4@mail.ru

**Усачев Вадим Александрович** — канд. техн. наук, начальник отдела Управления научной и инновационной деятельности МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: vau@bmstu.ru

**Топорков Алексей Геннадьевич** — ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: kafsm3@bmstu.ru

**Корянов Всеволод Владимирович** — канд. техн. наук, доцент, первый заместитель заведующего кафедрой «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru

## Formation of the scale of time of devices of frequency-time supporting by a method of structural analysis

© S.D. Petrov<sup>1</sup>, I.V. Chekunov<sup>2</sup>, V.A. Usachev<sup>3</sup>,  
A.G. Toporkov<sup>3</sup>, V.V. Koryanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russia

<sup>2</sup>Central Scientific and Production Association "CASCADE", Moscow, 125047, Russia

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The relevance of reliable high-precision navigation is confirmed by the organizational structure of the satellite radio navigation system (SRNS) GLONASS, in which there are no regular structures of electronic protection, in contrast to the American SRNS GPS, provided with standard systems "Select available" and "Antispoofing".*

*Under these conditions, it is necessary to constantly verify the reliability of the SRNS sync signals for the consumer, which is possible only with the formation of its own high-precision time scale. Own time scale provides verification of the reliability of navigation signals, "hot start" of the navigation equipment of the consumer, reducing the integration limits of time periods when solving the navigation task. Compensating for the error of low-frequency flicker noise by optimal filtering is a complex problem due to nonstationary. For the organization of optimal filtering, it is necessary to determine the correlation function and estimate the filtering by dispersion, which is unattainable for nonstationary processes. This problem is solved in this paper by applying the Kolmogorov theory to form a time scale using the mathematical apparatus of structural analysis.*

**Keywords:** time scale, group standard of time and frequency, GLONASS, time-and-frequency supporting, signal lag, spacecraft, GPS

### REFERENCES

- [1] Wang B., Lou Y., Liu J., Zhao Q. Analysis of BDS satellite clocks in orbit. *GPS Solutions*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 783–794. Springer. DOI: 10.1007/s10291-015-0488-7
- [2] Shi Ch., Guo Sh., Gu Sh., Yang X., Gong X., Deng Zh., Ge M., Schul H. Multi-GNSS satellite clock estimation constrained with oscillator noise model in existence of data discontinuity. *J. of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 4, pp. 515–528. Research Gate. DOI: 10.1007/s00190-018-1178-3
- [3] Makarenko B.I. *Kvartsevyye i kvantovyye mery chastoty* [Quartz and quantum frequency measures]. Moscow, USSR Ministry of Defense Publ., 1976, 413 p.
- [4] Bogdanov P.P., Druzhin V.E., Nechaeva O.E., Tyulyakov A.E. Sovershenstvovaniye chastotno-vremennogo obespecheniya GLONASS. *Science Research*, 2013, no. 3–4, pp. 12–16.
- [5] Kuzin S.P., Tatevyan S.K. Vklad sistemy DORIS v postroyeniye obshchezemnoy sistemy koordinat (ITRF2013). *Geodesy and cartography*, 2015, no. 6, pp. 2–9.
- [6] Matviyenko L.I. *Soobshcheniya instituta prikladnoy astronomii rossiyskoy akademii nauk — Reports of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2007, no. 176, pp. 1–35.
- [7] Petrov S.D., Chekunov I.V. Sozdaniye malogabaritnykh bortovykh pretsizionnykh apparatno-programmnykh khraniteley vremeni i chastoty (BKHVCH) na osnove

- strukturnogo analiza [Creation of compact on-board precision hardware-software time and frequency keepers (BHHW) based on structural analysis]. *XLI Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisov* [Proc. of the 41th Academic Readings on Cosmonautics devoted to the memory of S.P. Korolev, Academician, and other distinguished Russian scientists, space exploration pioneers]. Moscow, January 24–27, 2017. Moscow, BMSTU Publ., pp. 290, 291.
- [8] Stepanov A.V. *Elektricheskiye shumy* [Electrical noise]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2003, 27 p.
- [9] Belyaev A.A., Sakharov B.A., Kozlov A.K., Yakimov A.V. Fluktuatsii chastoty vodorodnogo standarta [Fluctuations in the frequency of the hydrogen standard]. *Trudy 1-go rabochego soveshchaniya po proyektu NATO SfP-973799 Semiconductors "Razrabotka radiatsionno-stoykikh poluprovodnikovyykh priborov dlya sistem svyazi i pretsizionnykh izmereniy s ispol'zovaniyem shumovogo analiza"* [Proceedings of the 1st NATO project workshop on SfP-973799 Semiconductors "Development of radiation-resistant semiconductor devices for communication systems and precision measurements using noise analysis"]. 2001, Nizhniy Novgorod, TALAM Publ, pp. 109–117.
- [10] Podlazov A.V. *The theory of self-organized criticality is the science of complexity*. Available at:  
<https://mipt.ru/students/organization/mezhpr/arxiv/mezhpred2/podlazov.pdf>  
[http://www.rf.unn.ru/NATO/1ws/SfP\\_Kozlov.pdf](http://www.rf.unn.ru/NATO/1ws/SfP_Kozlov.pdf) (accessed May 24, 2019).
- [11] Borisov B.D. *Models of power spectral density of Flicker noise*. Available at: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/АИПИИ-2-2015-8.pdf> (accessed May 24, 2019).
- [12] Petrov S.D., Smirnov S.S., Chekunov I.V., Hegay D.K. *Kompaktnyy gruppovoy avtonomnyy standart vremeni i chastoty (Proceedings of the Institute of Applied Astronomy RAS)*, 2016, no. 37, pp. 93–96.

**Petrov S.D.**, Cand. Sc. (Phys. and Math.), acting head of the department of astronomy of the St. Petersburg State University. e-mail: petr0v@mail.ru

**Chekunov I.V.**, chief design manager of the Central Scientific and Production Association "CASCADE". e-mail: onip4@mail.ru

**Usachev V.A.**, Cand. Sci. (Eng.), head of the Department of scientific and innovation activities, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vau@bmstu.ru

**Toporkov A.G.**, assistant of the Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of 6 publications in the field of ballistics and dynamics of motion of space and descent vehicles. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

**Koryanov V.V.**, Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of the Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of simulation of ballistics and dynamics of motion of space and descent vehicles. e-mail: kafsm3@bmstu.ru