

## МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ БОРТОВОЙ ШКАЛОЙ ВРЕМЕНИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ГЛОНАСС-К2»

М. Н. Уткин ✉, А. Г. Сайбель

АО «Российский институт радионавигации и времени»,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Бортвые квантовые стандарты частоты навигационных космических аппаратов могут испытывать непрогнозируемые малые скачки частоты. Данные скачки приводят к ухудшению точности навигационного поля и при существующих требованиях к погрешности определения местоположения не могут быть исключены из рассмотрения. Традиционный метод обнаружения скачков частоты с помощью наземной подсистемы контроля и управления не обеспечивает своевременного оповещения потребителей о снижении точности определения местоположения. Перспективным методом повышения целостности навигационного поля глобальной навигационной спутниковой системы является использование системы автономного непрерывного контроля шкалы времени бортового синхронизирующего устройства. В работе описана предложенная авторами схема построения основного элемента подобных систем – частотного компаратора. Основным отличием предлагаемой системы от существующих решений является применение преобразователя «временной интервал – цифровой код» для оценки поправки часов, что позволяет уменьшить массу, габариты и потребляемую устройством мощность. Рассмотрены особенности реализации частотного компаратора прямого преобразования для бортовой аппаратуры космического аппарата, а также представлена структурная схема разработанного и изготовленного макета.*

*Ключевые слова: скачки частоты, преобразование временных интервалов в цифровой код, частотный компаратор, автокалибровка.*

### Введение

Ряд потребителей ГЛОНАСС предъявляет жесткие требования к целостности навигационного поля. Целостность – способность системы обеспечить заданное качество излучаемых навигационных сигналов и передаваемой информации, а также оперативное предупреждение потребителя о превышении пороговой величины ошибки определения местоположения.

Одной из причин увеличения погрешности навигационного поля являются случайные скачкообразные изменения частоты бортовых квантовых генераторов [1], которые могут привести к увеличению ошибки навигационных определений до десятков метров. В настоящее время для оперативной оценки характеристик навигационного поля используются результаты измерений беззапросных измерительных средств из состава подсистемы контроля и управления ГЛОНАСС и закладка на борт КА информации о качестве излучаемого сиг-

нала для передачи потребителю. Интерфейсным контрольным документом ГЛОНАСС определено максимальное время формирования признака неисправности, которое составляет 16 часов [2].

### Текущее положение

Сокращение времени обнаружения скачков частоты достигается введением в состав бортового синхронизирующего устройства (БСУ) КА «Глонасс-К» аппаратуры управления бортовой шкалой времени (АУБШВ). Использование АУБШВ позволяет непрерывно (на всей траектории движения) и автономно (без использования наземного сегмента) контролировать частоту квантового генератора и сформировать признак достоверности навигационного поля до того, как ошибка определения дальности по данному КА превысит пороговое значение.

В основу работы системы положен принцип непрерывного сравнения шкал времени, формируемых на основе сигналов квантового стандарта частоты (КСЧ) и кварцевого генератора (КГ), которому не свойственны скачкообразные изменения

✉ utkinm@gmail.com

частоты. В процессе работы устройства формируется модель и прогноз поведения частоты КГ относительно частоты КСЧ. Резкое увеличение расхождения измеренной и прогнозной разностей частот указывает на неисправность квантового стандарта и приводит к формированию соответствующего телеметрического сигнала. Структурная схема АУБШВ представлена на рис. 1.

Одним из основных элементов АУБШВ является прецизионный частотный компаратор, предназначенный для сравнения шкал времени КСЧ и КГ и оценивания их среднеквадратического относительного двухвыборочного отклонения результатов измерения частоты (СКДО) на интервале измерения  $\tau_{и} = 1 \dots 100$  с. Оценка СКДО в частотном компараторе производится по измерениям поправки часов  $u$  [3]. Измерение поправки часов, в основном, осуществляется счетным методом, который не обеспечивает необходимой точности оценки. В связи с этим различными исследователями был предложен набор методов улучшения чувствительности ча-

стотных компараторов: метод частотных преобразований, метод гетеродина, метод двойного смешивания, корреляционный метод [4]. При разработке АУБШВ КА «Глонасс-К» применена цифровая реализация метода двойного смешивания частоты, которая обеспечивает заданную точность оценки поправки часов без периодической калибровки в течение всего срока активного существования космического аппарата. Для обеспечения заданной погрешности измерений используются два быстродействующих аналого-цифровых преобразователя (АЦП) с разрядностью 14 бит. Современные радиационно стойкие отечественные АЦП обладают повышенной потребляемой мощностью [5], что обуславливает использование дополнительных конструкторско-технологических мер по обеспечению тепловых режимов работы микросхем. Кроме того, повышенная частота работы АЦП определяет высокие требования к быстродействию блока цифровой обработки и приводит к дополнительному увеличению энергопотребления прибора.

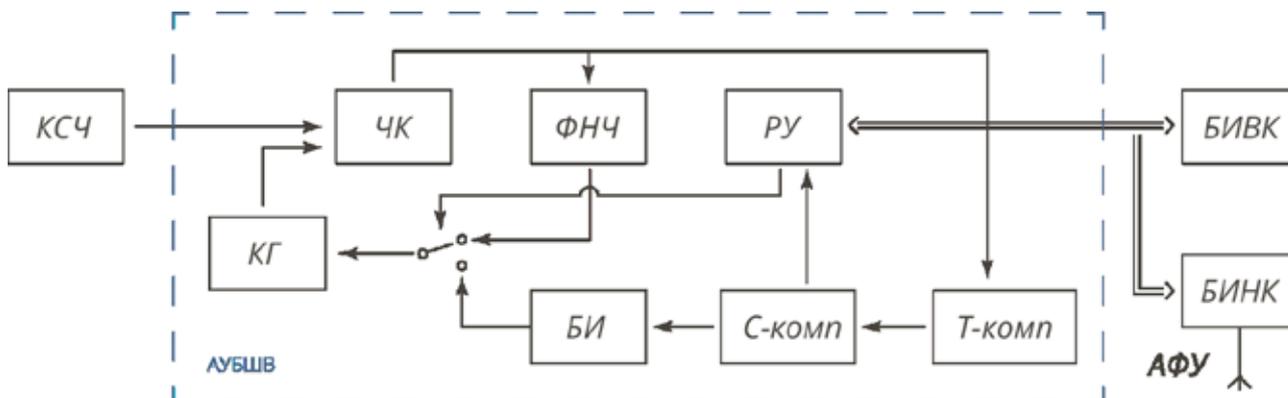


Рис. 1. Структурная схема АУБШВ.

КСЧ – квантовый стандарт частоты, КГ – кварцевый генератор, ЧК – частотный компаратор, Т-комп – блок температурной компенсации, С-комп – блок компенсации старения, РУ – решающее устройство, ФНЧ – фильтр нижних частот, БЭ – блок экстраполяции

## Модернизация АУБШВ

Для улучшения энергетических параметров бортовых частотных компараторов авторами предложена реализация частотного компаратора (ЧК) прямого преобразования [6], т. е. устройства, в котором необходимая разрешающая способность по величине поправки часов достигается без предварительного частотного или аналого-цифрового преобразования сигналов. Структура ЧК прямого преобразования представлена на рис. 2. Как видно, основным элементом ЧК является преобразователь временных интервалов в цифровой код, на выходе которого формируется цифровой код, пропорциональный длительности интервала времени между характерными точками входных сигналов (например, передними фронтами). Устройства данного

типа, как правило, реализуются в виде законченной интегральной схемы с низким энергопотреблением и обладают разрешающей способностью от единиц до десятков пикосекунд [7].

Использование в ЧК преобразователя временных интервалов в цифровой код предъявляет высокие требования к таким параметрам преобразователя как дифференциальная нелинейность, постоянная ошибка полной шкалы, температурная чувствительность ошибки начала шкалы и ошибки полной шкалы. Анализ открытых публикаций показывает, что всему комплексу требований не удовлетворяет ни один из разработанных ранее типов преобразователей [7]. Для решения данной задачи авторами разработана схема ПДА-преобразователя (ПДА – передискретизация, дидеринг, автокалибровка) временных интервалов в

цифровой код [6], в которой за счет применения методов передискретизации, двойной коррелированной выборки и автокалибровки существенно улучшены основные параметры преобразователя, определяющие характеристики ЧК в целом. Структурная схема ПДА-преобразователя представлена на рис. 3.

Основу ПДА-преобразователя составляют ВД и ДФ. В дискриминаторе осуществляется относительно грубое квантование интервала времени между фронтами импульсов на входах НИВ и КИВ. Спектр полезного сигнала, который описывает стабильность частоты квантового генератора, лежит в области низких частот, которая на несколько порядков ниже частоты следования импульсов на входах НИВ и КИВ. Благодаря этому доля мощности шума квантования ВД, которая попадает в полосу полезного сигнала, существенно меньше полной мощности шума. ДФ выделяет полосу частот полезного сигнала, повышая отношение «сигнал/шум квантования», и уменьшает высокую частоту следования отсчетов сигнала примерно до границы Котельникова.

Для уменьшения температурных флуктуаций погрешности начала шкалы используется метод двойной коррелированной выборки (ДКВ) [8], основанный на дополнительном измерении  $\hat{t}_2$  ошибки начала шкалы, которое затем используется для коррекции результатов измерения  $\hat{t}_1$  рабочего интервала времени. Для уменьшения флуктуаций погрешности полной шкалы используется метод автокалибровки [7], который заключается в измерении методом ДКВ интервала времени заранее известной длительности  $T_0$  и использовании результата  $\hat{t}_3 - \hat{t}_2$  для корректировки ошибки полной шкалы:

$$\hat{t} = \frac{\hat{t}_1 - \hat{t}_2}{\hat{t}_3 - \hat{t}_2} T_0,$$

где  $\hat{t}$  – оценка рабочего интервала времени, свободная от погрешности начала шкалы и полной шкалы.

Проведенный теоретический анализ показал, что для достижения необходимых характеристик частотного компаратора АУБШВ при оценке СКДО частоты выходного сигнала КСЧ с номинальной

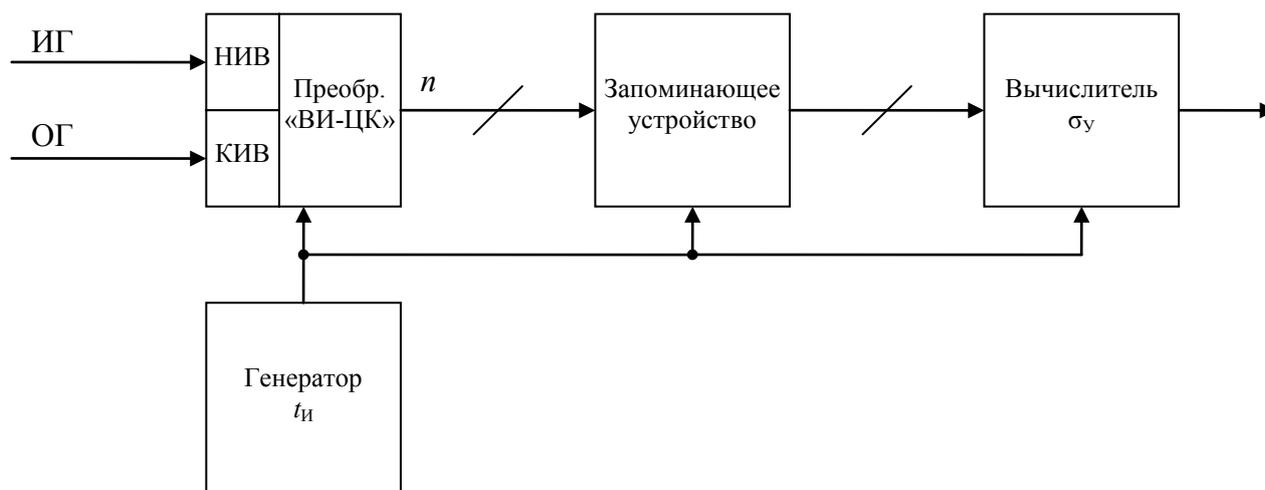


Рис. 2. Структурная схема ЧК на основе преобразователя «временной интервал – цифровой код». ИГ – исследуемый генератор, ОГ – опорный генератор, НИВ – вход начала интервала времени, КИВ – вход конца интервала времени

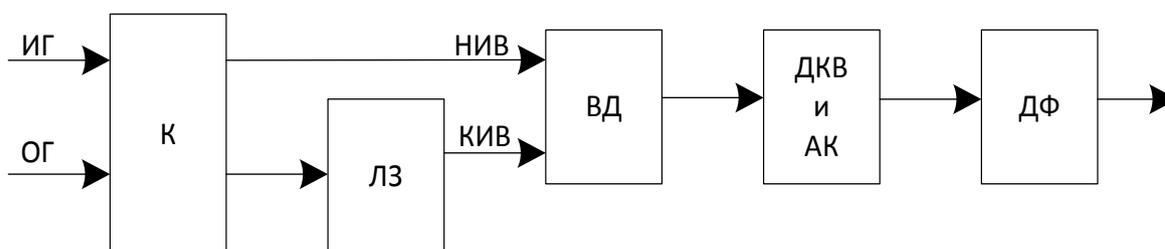


Рис. 3. Структурная схема ПДА-преобразователя «временной интервал – цифровой код». ЛЗ – линия задержки, ВД – временной дискриминатор, ДКВиАК – блок двойной коррелированной выборки и автокалибровки, ДФ – децимирующий фильтр

частотой 5 МГц необходим ПДА-преобразователь временных интервалов в цифровой код, в состав которого входит временной дискриминатор с разрешающей способностью 25 пс, дифференциальной нелинейностью не более 1 единицы младшего разряда, диапазоном преобразуемых интервалов времени 220 нс и временем преобразования не более 400 нс. Разрядность преобразователя при таких характеристиках равна 14. Требование обеспечить достаточно высокую разрешающую способность и большую разрядность преобразования определяет необходимость применения конвейерной схемы временного дискриминатора. Конвейерная схема включает в себя не менее двух преобразователей, один из которых осуществляет грубое квантование временного интервала и формирует сигнал ошибки между грубой оценкой интервала времени и его истинной величиной. Данный сигнал ошибки, величина которого не превышает одной-двух (в зависимости от реализации) единиц младшего разряда грубого кода, поступает на вход точного преобразователя, где формируется его оценка с требуемой погрешностью. Линейная комбинация двух результатов преобразования определяет итоговую оценку рабочего интервала времени.

Характерной особенностью каскадных схем является необходимость согласования коэффициентов передачи каскадов преобразователя, т. е. определение отношения единиц младшего разряда грубого и точного преобразователя. Задача согласования каскадов может быть решена с использованием систем автоподстройки или автокалибровки [7]. Системы автоподстройки основаны на аналоговом управлении параметрами схемы по тому или иному критерию и плохо пригодны для реализации на современных технологических процессах КМОП с нормами изготовления элементов кристалла 90 нм и менее. Кроме того, такие системы потребляют большую мощность по сравнению с системами второго типа. Поэтому для реализации ПДА-преобразователя целесообразно использовать каскадные преобразователи с автокалибровкой, которые избавлены от недостатков аналоговых систем подстройки.

Распространенными схемами автокалибровки преобразователей являются тест плотности кодовых слов [9; 10] или прямое измерение шага квантования грубого преобразователя в единицах младшего разряда точного каскада [11]. Обе схемы требуют прерывания процедуры преобразования рабочего интервала времени на время автокалибровки, т. е. в течение автокалибровки не выполняется контроль непрерывности шкалы времени КА. Для устранения данного недостатка авторами предложена схема преобразователя, в которой осуществление взаимной калибровки грубого и точного каскадов происходит одновременно с преобразованием рабочего интервала времени, т. е. не-

прерывно. Работа схемы непрерывной калибровки (рис. 4) основана на том факте, что при рассогласовании единиц младшего разряда грубого и точного каскадов происходит увеличение дисперсии оценки рабочего интервала времени [12]. Для реализации разработанного метода в схеме по выборке измерений оценивается дисперсия ошибки преобразования интервала известной длительности  $T_0$  (который используется для автокалибровки ПДА-преобразователя) при двух значениях калибровочного коэффициента. По двум полученным оценкам вычисляется градиент дисперсии и новое значение калибровочного коэффициента. Для данного коэффициента выполняется оценка дисперсии измерений интервала  $T_0$ . Снова вычисляется градиент дисперсии и следующее значение калибровочного коэффициента. Описанным методом реализуется итерационный поиск оптимального калибровочного коэффициента, который отвечает минимуму дисперсии оценок. Объем выборки определяется исходя из заданной погрешности и надежности оценки дисперсии.

Минимизация потребляемой устройством мощности возможна при построении частотного компаратора на базе одной интегральной схемы. Для минимизации стоимости и сроков разработки изделия целесообразно использовать полужаказные схемы на основе базовых матричных кристаллов (БМК). Анализ стойкой к специальным внешним воздействующим факторам отечественной элементной базы показал, что наилучшими параметрами по быстродействию логических элементов, которая определяет достижимую разрешающую способность временного дискриминатора, обладают аналого-цифровые БМК 5400ТР045А АЕНВ.431260.237ТУ (АО «Дизайн-центр «Союз»). Данные БМК обеспечивают время переключения логического двоичного инвертора не более 70 пс, количество быстродействующих цифровых вентилях – 31450, микросхемы реализованы в компактных 28-выводных корпусах и отвечают требованиям по надежности и стойкости к специальным внешним воздействующим факторам, заданным на бортовую аппаратуру КА.

В соответствии с принятым маршрутом проектирования БМК, отработка «зашивки» БМК после предварительного моделирования происходит на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Данный подход позволяет сократить время и стоимость отработки, т. к. помогает на ранних этапах выявить ошибки проектирования, которые не могли быть обнаружены с помощью модели. Для отработки зашивки выбрана ПЛИС семейства Cyclone IV фирмы Altera, которая обеспечивает схожее с БМК быстродействие и логическую емкость, а также не попадает под ограничения по поставке.

Структурная схема разработанного и изготовленного макета частотного компаратора прямого преобразования представлена на рис. 5. Макет реализует полностью законченный частотный компаратор, изображенный на рис. 2. Функционально макет состоит из двух компараторов напряжения, ПЛИС, управляемой линии задержки и интерфейсной микросхемы. Компараторы напряжения используются для преобразования синусоидальных входных сигналов в последовательность прямоугольных импульсов с требуемыми уровнями напряжений. ПЛИС ис-

пользуется для реализации ПДА-преобразователя временных интервалов в цифровой код на базе конвейерного временного дискриминатора, реализации функций управления работой преобразователя и обмена по последовательному интерфейсу. Линия задержки в соответствии с логикой функционирования ПДА-преобразователя обеспечивает декорреляцию ошибок квантования путем случайного изменения длительности преобразуемого интервала времени. Интерфейсная микросхема используется для связи с персональным компьютером.

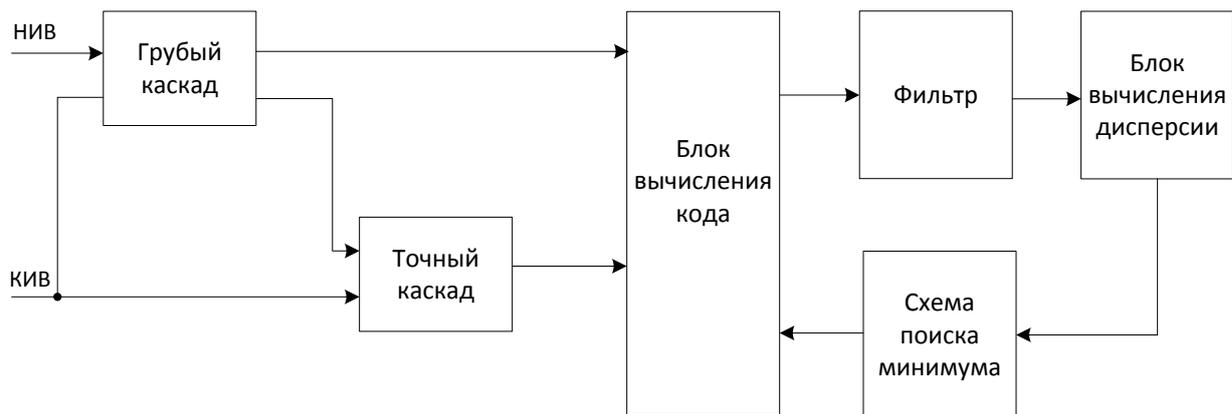


Рис. 4. Структурная схема конвейерного временного дискриминатора с непрерывной автокалибровкой

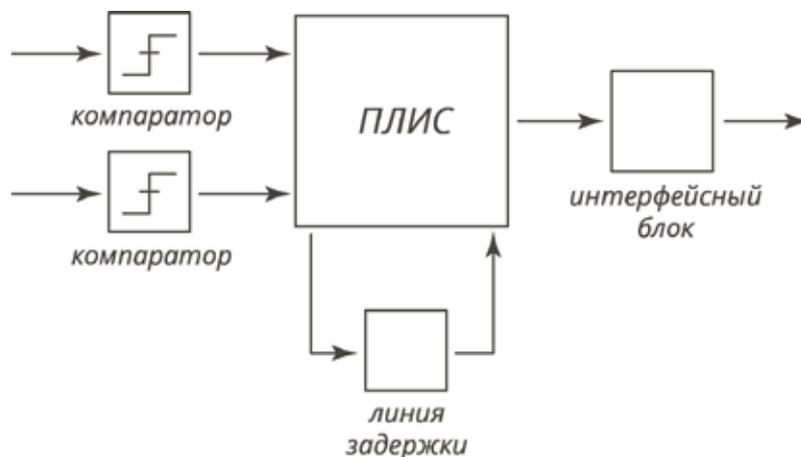


Рис. 5. Структурная схема макета частотного компаратора АУБШВ

## Заключение

Предложенные авторами технические решения, вкуче с проведенным теоретическим анализом, подтверждают возможность построения системы автономного непрерывного контроля шкалы времени бортового синхронизирующего устройства на базе частотного компаратора прямого преобразования, построенного с использованием ПДА-преобразователя, что позволит улучшить массогабаритные и энергетические ха-

рактеристики АУБШВ из состава модернизированного БСУ КА «Глонасс-К». Предварительные оценки показывают уменьшение массы частотного компаратора из состава АУБШВ в 2–2,5 раза, потребляемой мощности – в 3 раза. В ходе дальнейшего исследования планируется завершить экспериментальное исследование макета частотного компаратора на ПЛИС с целью подтвердить корректность основных положений разработанной методики синтеза частотных компараторов прямого преобразования.

## Список литературы

- [1] Wang Q., Rochat P. An anomaly clock detection algorithm for a robust clock ensemble // 41st Annual Precise Time and Time Interval Meeting. 2009, pp. 121–129.
- [2] ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). М. : РНИИКП, 2008. 72 с.
- [3] ГОСТ 8.567-2014. Измерение времени и частоты. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2014. 16 с.
- [4] Handbook of frequency stability analysis : NIST Special Publication 1065 / W. J. Riley. Gaithersburg : NIST, 2008. 136 p.
- [5] Глухова С. А., Тиунов В. В., Хорожевский И. С. Микросхемы интегральные. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи. М. : Дейтон, 2018. 211 с.
- [6] Уткин М. Н. Математическая модель частотного компаратора на основе преобразователя «временной интервал – цифровой код», учитывающая нелинейные статические характеристики преобразователя // Материалы IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018.
- [7] Time-to-Digital Converters / S. Henzler. Netherlands : Springer, 2010. 124 p.
- [8] Wey H. M., Guggenbuhl W. Noise Transfer Characteristics of a Correlated Double Sampling Circuit // IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1986, vol. 1, no. 10, pp. 1028–1030.
- [9] Samarah A., Carusone A. C. A Digital Phase-Locked Loop with Calibrated Coarse and Stochastic Fine TDC // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2013, vol. 48, pp. 1829–1841.
- [10] Ito S., Nishimura S., Kobayashi H., Uemori S., Tan Y., Takai N., Yamaguchi T. J., Niitsu K. Stochastic TDC architecture with self-calibration // IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2010, pp. 1027–1030.
- [11] Lee M., Abidi A. A. A 9 b, 1.25 ps Resolution Coarse–Fine Time-to-Digital Converter in 90 nm CMOS that Amplifies a Time Residue // IEEE Journal of Solid State Circuits, 2008, vol. 43, pp. 769–777.
- [12] Патент РФ № 171560. Устройство преобразования временных интервалов в цифровой код с автокалибровкой / Уткин М. Н. 2017, Бюл. № 16.

## MODERNIZATION OF TIME SCALE CONTROL UNIT FOR «GLONASS-K2» SPACECRAFTS

**M. N. Utkin, A. G. Saybel**

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

*Navigation spacecraft's atomic clocks suffer from sudden small frequency jumps. These jumps lead to a decrease of user's positioning accuracy and should be considered. Traditional method to detect these frequency jumps with the use of ground control segment does not ensure early user alert of increasing range error. A perspective way to improve global navigation satellite system's signal integrity is the use of satellite on-board autonomous system for continuous control of board synchronization equipment time scale. This paper describes a novel diagram of frequency comparator – the main element of such system. The main difference of proposed solution is an application of time-to-digital converter for estimation of time error which allows to decrease mass, dimensions and power consumption. The paper deals with the particularities of direct frequency comparator implementation for on-board equipment of space vehicle and describes structure of implemented breadboard model.*

*Keywords: frequency jumps, time-to-digital conversion, frequency comparator, self-calibration.*

## References

- [1] Wang Q., Rochat P. An anomaly clock detection algorithm for a robust clock ensemble // 41st Annual Precise Time and Time Interval Meeting. 2009, pp. 121–129.
- [2] GLONASS. Interfejsnii control'nii document. Navigacionnii radiosignal v diapazonah L1, L2 (redakciya 5.1) [GLONASS. Interface control document. Navigation signals in L1, L2 bands (ver. 5.1)]. Moscow, RNIIPK, 2008, 72 p. (In Russian)
- [3] GOST 8.567-2014 *Izmerenie vremeni i chastoti. Termini i opredeleniya* [GOST 8.567-2014 Time and frequency measurements. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2014, 16 p. (In Russian)

- [4] Handbook of frequency stability analysis : NIST Special Publication 1065 / W. J. Riley. Gaithersburg : NIST, 2008, 136 p.
- [5] Glukhova S. A., Tiunov V. V., Khoronjevckiy I. S. *Mikroshemi integral'nie. Tsifro-analogovie i analogo-tsifrovie preobrazovateli* [Integrated circuits. Digital-to-analog and analog-to-digital converters]. Moscow, Deiton, 2018, 211 p. (In Russian)
- [6] Utkin M. N. *Matematicheskaya model' chastotnogo komparatora na osnove preobrazovatel'ia «vremennoi interval – tsifrovoi kod», uchitivaushaiya nelineinie staticheskie harakteristiki preobrazovatel'ia* [Mathematical model of frequency comparator based on time-to-digital converter which accounts for nonlinear static characteristics of converter] // *Tezisy dokladov IX Mezdunarodnogo simposiuma «Metrologia vremeni i prostranstva»* [Abstracts of the IX International Symposium «Metrology of time and space»]. FSUE «VNIIFTRI», 2018. (In Russian)
- [7] Time-to-Digital Converters / S. Henzler. Netherlands : Springer, 2010. 124 p.
- [8] Wey H. M., Guggenbuhl W. Noise Transfer Characteristics of a Correlated Double Sampling Circuit // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1986, vol. 1, no. 10, pp. 1028–1030.
- [9] Samarah A., Carusone A. C. A Digital Phase-Locked Loop with Calibrated Coarse and Stochastic Fine TDC // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2013, vol. 48, pp. 1829–1841.
- [10] Ito S., Nishimura S., Kobayashi H., Uemori S., Tan Y., Takai N., Yamaguchi T. J., Niitsu K. Stochastic TDC architecture with self-calibration // *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, 2010, pp. 1027–1030.
- [11] Lee M., Abidi A. A. A 9 b, 1.25 ps Resolution Coarse–Fine Time-to-Digital Converter in 90 nm CMOS that Amplifies a Time Residue // *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 2008, vol. 43, pp. 769–777.
- [12] Utkin M. N. *Ustroistvo preobrazovaniya vremennih intervalov v tsifrovoi kod s avtokalibrovkoi* [Time-to-digital converter with autocalibration]. Patent RU 171560, 2017, bulletin no. 16.