

«ПОТОК» – РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ПЛАТФОРМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

**Р. С. Куликов, С. В. Вишняков,
А. П. Малышев✉, М. А. Орлова, Т. А. Бровка**

*Национальный исследовательский институт «МЭИ»
г. Москва, Российская Федерация*

В настоящее время глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС находится на этапе модернизации. С целью рассмотрения и выбора наилучшего варианта развития системы необходимо создание инструмента для моделирования, который может обеспечить корректное воспроизведение и взаимодействие разнообразных и различных по своей структуре модернизируемых элементов и взаимосвязей между ними. Основной целью работы является изложение структуры и базовых принципов функционирования данного инструмента. Реализация данных принципов выполнена в открытой платформе «Поток», развиваемой по инициативе НИУ «МЭИ», позволяющей конфигурировать цифровые двойники системы ГЛОНАСС и моделировать систему в целом для решения широкого спектра задач. В статье рассмотрены и обоснованы заложенные в платформу принципы. Изложена схема организации платформы, техническая реализация платформы, а также фундаментальные требования к используемым в платформе компьютерным моделям. Организационной основой платформы является взаимодействие экспертного совета с сообществом разработчиков. Техническая реализация платформы состоит из распределённой вычислительной сети, репозитория компьютерных моделей, а также узла управления сеансом моделирования. Для описания разнообразных и разнородных элементов системы ГЛОНАСС используется понятие идеальной дискретной шкалы модельного времени. Все элементы системы ГЛОНАСС представлены в виде разностных уравнений, описывающих эволюцию состояния элементов во времени.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, цифровой двойник, распределённая платформа, компьютерное моделирование.

Введение

Развитие сложных систем, к которым относятся и спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС, и введение в их состав новых элементов может проходить по множеству направлений, часть из которых друг друга взаимно исключают. Проектирование вариантов развития любой системы на ранней стадии проводится с помощью анализа и моделирования. На практике разработчиками используется широкий ассортимент частных моделей элементов системы ГЛОНАСС для той или иной предметной области:

– навигационных космических аппаратов (НКА) [1];

– функциональных дополнений [2];
– наземного комплекса управления [3];
– навигационной аппаратуры потребителей (НАП) [4] и многих других.

Различные модели одного и того же объекта ГНСС ГЛОНАСС по-разному учитывают различные факторы и дают различные результаты моделирования, которые служат частными аргументами в пользу различных вариантов развития системы. В то же время в целях повышения объективности выбора наиболее целесообразных направлений развития системы ГЛОНАСС и их приоритизации требуется инструмент для единой объективной оценки показателей качества той или иной конфигурации системы ГЛОНАСС в целом.

В настоящее время в процессе создания находятся две модели системы ГЛОНАСС, разрабатываемые в рамках государственных заказов,

✉ MalyshevAP@mpei.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

предназначенные для внутреннего пользования эксплуатирующими организациями, а также предлагаемая в данной статье распределённая платформа моделирования цифровых двойников системы ГЛОНАСС «Поток». Результаты работы ведомственных моделей планируется учитывать при выборе путей развития системы ГЛОНАСС, а открытая платформа «Поток» предназначена для широкого круга разработчиков в качестве повседневного инструмента для предварительной оценки влияния тех или иных технических решений на показатели качества системы ГЛОНАСС. Для обеспечения работы и взаимодействия широкого круга потребителей необходимо заложить в платформу технические, технологические и организационные возможности. Таким образом, целью работы является формулирование и обоснование ключевых особенностей работы платформы «Поток».

1. Организационные особенности

Организационная работа платформы основана на непрерывном взаимодействии широкого круга сообщества разработчиков и экспертного совета платформы через открытый репозиторий платформы и банка цифровых двойников системы.

Экспертный совет, формируемый при платформе, состоит из специалистов и представителей заинтересованных организаций. Задачами совета являются формирование запроса к сообществу разработчиков на создание моделей элементов системы ГЛОНАСС, экспертиза размещённых в репозитории программных модулей и конфигурирование цифровых двойников, рекомендуемых для решения тех или иных задач моделирования.

Программные модули, создаваемые сообществом разработчиков, сохраняются в общедоступном репозитории; каждый пользователь платформы имеет возможность разместить в репозитории собственный программный модуль, созданный в соответствии с требованиями руководства разработчика. Поскольку один и тот же элемент системы ГЛОНАСС может быть описан с той или иной степенью подробности, репозиторий будет содержать множество программных модулей. Из размещённых в репозитории различных программных модулей пользователем конфигурируется тот или иной вариант цифрового двойника системы ГЛОНАСС, который сохраняется в банке цифровых двойников, в целом проводится сеанс моделирования. Общая организационная схема платформы «Поток» представлена на рисунке 1.

В репозитории общедоступного открытого варианта платформы «Поток» размещаются программные модули, не содержащие сведений ограниченного доступа. Для работы со сведениями ограниченного доступа по договорённости с заинтересованными организациями возможен вариант платформы, разворачиваемый в безопасной локальной информационно-вычислительной сети.

2. Технические особенности

Платформа «Поток» обладает рядом технических и технологических особенностей, позволяющих выполнять моделирование большого числа объектов с учетом множественных взаимосвязей между ними. Рассмотрим описание математических моделей и их программную реализацию для возможности использования на платформе.

Для возможности корректного описания взаимодействия различных разнородных элементов

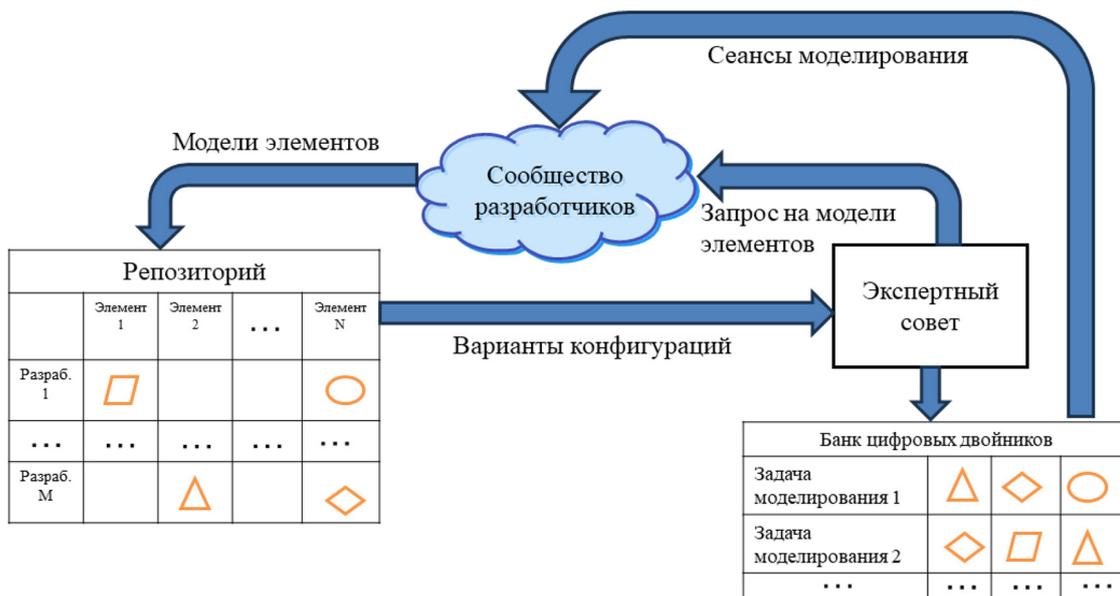


Рисунок 1. Организационная схема платформы «Поток»

ГНСС ГЛОНАСС, имеющих собственный ход часов, например, несколько НАП, разнесенных в пространстве, или НКА с собственным бортовым синхронизирующим устройством, требуется ввести абстрактную величину, относительно которой будет описываться ход часов всех моделируемых элементов. Такой абстрактной величиной на платформе «Поток» является понятие идеальной шкалы времени (ШВ) t^{uo} [5] моделирования, являющейся количественным описанием непрерывного физического «идеального» времени t [6]. Такое понятие позволяет корректно описывать состояния объектов и их взаимодействие на один и тот же момент времени $T(t^{uo})$ идеальной ШВ, как показано в работе [7].

Процедура моделирования проводится в дискретном виде с фиксированным интервалом времени T_{mod} между $i-1$ и i тактами, что выполняется соотношением (1):

$$T_{mod} = T(t_{i-1}^{uo}) - T(t_i^{uo}), \quad (1)$$

где $T(t_{i-1}^{uo})$, $T(t_i^{uo})$ – моменты времени в идеальной ШВ.

Значение T_{mod} устанавливается индивидуально для каждого сеанса моделирования на платформе. При этом формальные ограничения на значение T_{mod} отсутствуют и определяются требуемой точностью моделирования и решаемой задачей.

Описание состояния объектов в единой ШВ позволяет воспроизводить различные эффекты, связанные со средой распространения радиосигналов и имеющие пространственно-временную корреляцию, такие как задержка прохождения радионавигационных сигналов в ионосфере [8] и их многолучевое распространение [9]. Поскольку данные эффекты зависят от трассы прохождения сигнала и не зависят от параметров, например НАП, при описании эффектов, связанных с распространением радиосигналов, для двух НАП, находящихся в одной точке, в их индивидуальных ШВ результат будет отличаться.

Рассмотрим обобщенное описание моделируемых элементов системы ГЛОНАСС. Каждый моделируемый объект на платформе описывается собственным вектором состояния (ВС) x . Системы уравнений, описывающие эволюцию ВС на i такт моделирования, в общем виде описываются выражением (2):

$$x_i = f(x_{i-1}) + g(e_{i-1}) + h(r_{i-1}), \quad (2)$$

где $f(x_{i-1})$, $g(e_{i-1})$, $h(r_{i-1})$ – векторные функции от векторных аргументов, x_{i-1} , e_{i-1} , r_{i-1} – вектор состояния, вектор входных воздействий и вектор случайных возмущений соответственно на предыдущий такт моделирования в идеальной ШВ.

Вектор выходных воздействий объекта, описывающий воздействие данного объекта на дру-

гие и на систему в целом, в свою очередь, является функцией от вектора состояния x_i (3):

$$o_i = J(x_i), \quad (3)$$

где $J(x_i)$ – векторная функция векторного аргумента.

Вектор входных воздействий e_{i-1} является совокупностью выходных векторов o_{i-1} других объектов.

Предлагаемый вариант эволюции ВС (2) позволяет воспроизводить случайные отказы элементов системы, например, в результате сбоя в работе бортового программного и/или аппаратного обеспечения НКА [10] и обрабатывать алгоритмы автономного контроля целостности в НАП (англ. Receiver autonomous integrity monitoring, RAIM) [11].

Для моделируемых объектов, имеющих собственную ШВ, текущее значение времени в данной ШВ $T(t_i^{объект})$ должно входить в ВС x_i и выходной вектор объекта o_i . При необходимости допускается увеличение частоты дискретизации в (2), то есть введение дополнительных отсчетов между $i-1$ и i тактами внутри одного объекта. Повышение частоты дискретизации выполняется только для идеальной ШВ с последующим пересчетом данных моментов времени в собственную ШВ. Введение дополнительных отсчетов позволяет моделировать различные процессы с малым временем корреляции. Например, для обработки алгоритмов первичной обработки в НАП ГНСС [12].

Рассматривая выражения (2) и (3) можно отметить, что «эволюция» ВС каждого моделируемого объекта зависит только от входных аргументов на предыдущий момент времени $T(t_{i-1}^{uo})$ и не зависит от текущего состояния других моментов времени на текущий момент времени. Это позволяет рассматривать объекты как независимые на текущий такт моделирования, а также учитывать сложные перекрестные взаимосвязи элементов системы ГЛОНАСС, пример которых приведен на рисунке 2.

Данный подход имеет недостаток, связанный с незначительным усложнением математического описания моделей элементов системы ГЛОНАСС по сравнению с принятыми частными моделями [13–15].

3. Технологические особенности

С точки зрения вычислений «Поток» представляет собой распределенную кластерную систему, содержащую множество вычислительных узлов, объединенных в сеть.

Управлением системы занимается центральный вычислительный узел – сервер (узел) управления. Сервер управления выполняет следующие функции:

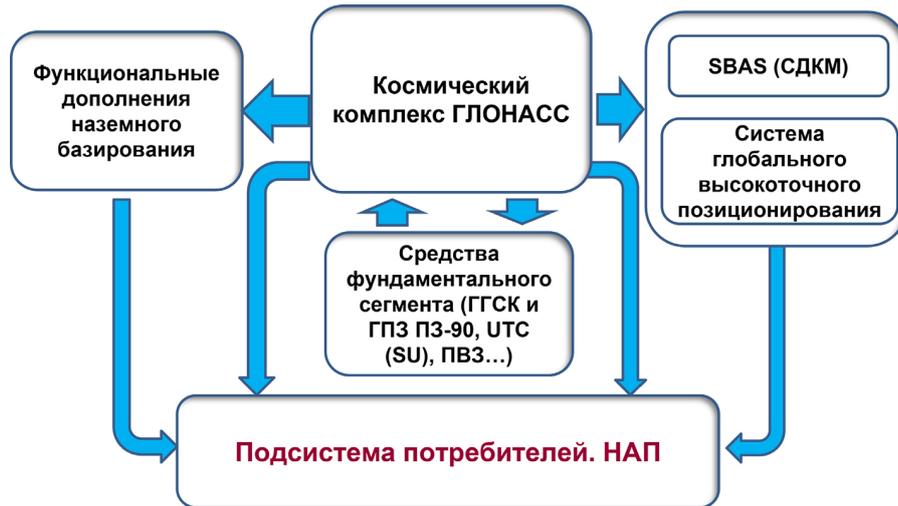


Рисунок 2. Архитектура системы ГЛОНАСС

- создание сети;
- настройка сети;
- подготовка к сеансу моделирования;
- управление сеансом моделирования.

При запуске очередного сеанса моделирования сервер управления создает для каждого пользователя платформы виртуальную сеть, внутри которой выполняется обмен данными между всеми вычислительными узлами сети и потребителем, как показано на рисунке 3.

Каждый вычислительный узел реализован в виде виртуальной машины и содержит в себе программный модуль того или иного элемента ГНСС ГЛОНАСС. Программные модули запу-

скаются на различных компьютерах, виртуальных и/или реальных, связанных через Интернет. Программный модуль содержит реализацию математической модели на произвольном языке программирования, а также программные средства информационно-логического взаимодействия (ИЛВ) с платформой.

ИЛВ всех участников платформы осуществляется через виртуальную сеть, индивидуальную для каждого пользователя платформы. Обмен информацией между всеми участниками проводится через информационную шину, которая содержит в себе все выходные векторы от всех моделируемых объектов. Каждый программный модуль при

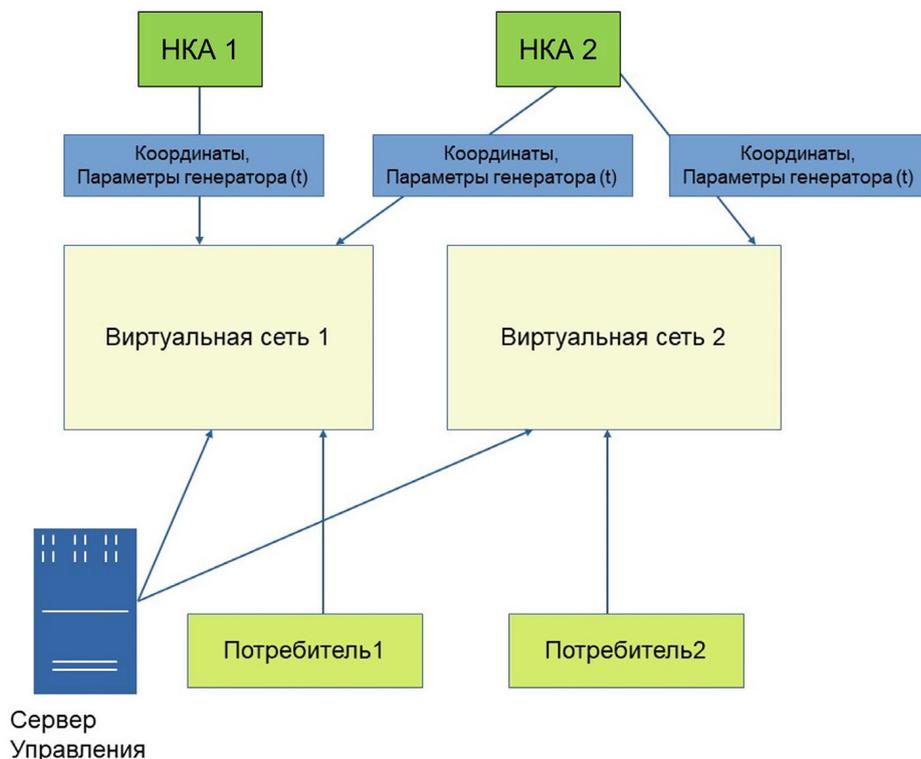


Рисунок 3. Структура сети платформы

начале очередного такта моделирования забирается с шины в соответствии со своей спецификацией.

После получения необходимых данных и формирования вектора входных переменных вычислительный узел осуществляет расчет в соответствии с заданной математической моделью объекта (2) и формирует вектор выходных переменных (3), отправляя его в узел управления.

После получения информации о результатах моделирования объектов, входящих в систему, узел управления выдает широковещательную команду для всех узлов на завершение такта моделирования. Затем передает все полученные данные пользователю для хранения и дальнейшей обработки и выдает команду для начала нового такта.

Таким образом, для размещения программной модели на платформе требуется разработать программный модуль, реализующий математическую модель, описанную в соответствии с (2), (3) и обеспечивающий ИВЛ с вычислительной сетью.

Заключение

Предложенные в работе базовые принципы работы платформы моделирования системы ГЛОНАСС позволяют сформировать задел для её развития и масштабирования. Дальнейшая работа будет распределена по трем направлениям. Первым направлением является реализация описанных в данной работе организационных мероприятий, в частности поиск заинтересованных лиц из сообщества разработчиков и формирование экспертного совета платформы. Второе направление – создание технологических решений, таких как обеспечение возможности подключения разработчиков и создание репозитория моделей. Последним направлением являются технические решения, определения параметров каждого элемента системы ГЛОНАСС, достаточного для выстраивания взаимосвязей между ними и наполнения репозитория моделей.

Список литературы

- [1] Ромм Я. Е., Джанунц Г. А. Моделирование движения навигационных спутников системы ГЛОНАСС на основе кусочно-интерполяционного решения задачи Коши для дифференциальной системы // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 2. С. 88–101.
- [2] Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения: официальный сайт. Системы функциональных дополнений ГНСС – 2022. – URL: https://glonass-iac.ru/guide/function_dop.php (дата обращения: 23.12.2023). Текст: электронный.
- [3] Бояркева О. В. Применение методов имитационного моделирования для исследования точности беззапросных траекторных измерений по навигационным спутникам ГЛОНАСС: канд. дисс. Новосибирск. ФГУП «СНИИМ», 2011. 125 с.
- [4] Михайлова О. К., Корогодин И. В. Обработка сигналов с цифровой поднесущей двумя традиционными каналами коррелятора // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202109-01>
- [5] ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника. 2020. 1072 с.: ил. ISBN 978–5–93108–198–4
- [6] Поваляев А. А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника. 2008. 328 с., ил.
- [7] Мальшев А. П., Пудловский В. Б., Куликов Р. С., Бровко Т. А., Чугунов А. А. Особенности построения шкалы моделирования цифрового двойника системы ГЛОНАСС. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: Тезисы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции. Москва: АО «Российские космические системы». 2023. 164 с.
- [8] Пудловский В. Б., Мальшев А. П., Бровко Т. А. Описание составляющих погрешности псевдодалности в ГНСС для моделирования качества навигационного обеспечения. Метрология времени и пространства. Тезисы XI симпозиума, Менделеево. 2023 г.
- [9] Chen X., Morton Y. J., Yu W. and Truong T.-K. GPS L1CA/BDS B II Multipath Channel Measurements and Modeling for Dynamic Land Vehicle in Shanghai Dense Urban Area, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 14247–14263, Dec. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3038646.
- [10] Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Приложение С. Оценка текущих эксплуатационных характеристик и частоты отказов. Редакция 2.2 (6.2019). Королёв 2019 г.
- [11] Zhang L., Li J., Cui T. and Liu S. An adapted RAIM algorithm for urban canyon environment, 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS, Harbin, China, 2017, pp. 116–121, doi: 10.1109/CPGPS.2017.8075108
- [12] Перов А. И. Одноэтапный алгоритм оценивания угла ориентации базовой линии по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 11. С. 82–94. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202311-14>
- [13] Корогодин И. В., Днепров В. В. Имитационная модель радиочастотного блока и корреляционного канала навигационного приемника. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2015613724 от 24.03.2015

[14] Коровин А. В. ГНСС-НВО. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2020617239 от 02.07.2020

[15] Капулин Д. В., Дмитриев Д. Д., Кремез Н. С. Компьютерная модель ГНСС-приемника. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2017618401 от 13.06.2017

«ПОТОК» – DISTRIBUTED PLATFORM FOR MODELING DIGITAL TWINS OF THE GLONASS

**R. S. Kulikov, S. V. Vishnyakov,
A. P. Malyshev, M. A. Orlova, T. A. Brovko**

*National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, The Russian Federation*

The GLONASS global navigation satellite system (GNSS) is currently at the stage of modernisation. In order to consider and select the best option for the development of the system, it is necessary to create a modelling tool that can ensure the correct reproduction and interaction of diverse and different in its structure modernised elements and interrelationships between them. The main purpose of the work is to outline the structure and basic principles of the functioning of this tool. The implementation of these principles is carried out in the open platform “Potok”, developed on the initiative of the National Research University “MPEI”, which allows to configure digital twins of the GLONASS system and to model the system as a whole to solve a wide range of problems. In the article the principles laid down in the platform are considered and justified. The scheme of the platform organisation, technical implementation of the platform, as well as fundamental requirements to the computer models used in the platform are stated. The organisational basis of the platform is the interaction of the expert council with the community of developers. The technical implementation of the platform consists of a distributed computing network, a repository of computer models, as well as a node for modelling session management. To describe the diverse and heterogeneous elements of the GLONASS system, the concept of an ideal discrete scale of modelling time is used. All elements of the GLONASS system are described in the form of difference equations describing the evolution of the state of the elements in time.

Keywords: GLONASS, digital twin, distributed platform, computer modelling.

References

- [1] Romm Ya. E., Dzhannunts G. A. Modelling of the GLONASS navigation satellites motion on the basis of the piecewise interpolation solution of the Cauchy problem for the differential system (in Russian) // Modern high technology, 2023, no. 2, pp. 88–101.
- [2] Applied consumer centre GLONASS information-analytical centre of coordinate-time and navigation support: official site. GNSS augmentations (in Russian) – 2022. – URL: https://glonass-iac.ru/guide/function_dop.php (date of reference: 23.12.2023). Text: electronic.
- [3] Boyarkeeva O. V. Application of simulation modelling methods to study the accuracy of demand-free trajectory measurements by glonass navigation satellites: PhD Novosibirsk. FSUE “SNIIM”, 2011, 125 p. (in Russian)
- [4] Mikhailova O. K., Korogodin I. V. BOC signals processings by two traditional correlator channels // Radiotekhnika, 2021, vol. 85, no. 9, pp. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202109-01> (in Russian)
- [5] GLONASS. Modernisation and prospects of development. Monograph / Edited by A. I. Perov. – Moscow: Radiotekhnika, 2020, 1072 p.: ill. ISBN 978–5–93108–198–4 (in Russian)
- [6] Povalyaev A. A. Satellite radio-navigation systems: time, clock readings, measurement formation and relative coordinates estimation. – Moscow: Radiotekhnika, 2008, 328 p., ill. (in Russian)

- [7] Malyshev A. P., Pudlovskiy V. B., Kulikov R. S., Brovko T. A., Chugunov A. A. Features of modelling time scale of a digital twin of GLONASS. Actual problems of rocket-space instrumentation and information technologies: Theses of reports of XI All-Russian scientific and technical conference. Moscow: AO “Russian Space Systems”, 2023, 164 p. (in Russian)
- [8] Pudlovsky V. B., Malyshev A. P., Brovko T. A. (FSBEI HE NRU «МЭИ») – Description of pseudorange error components in GNSS for modelling quality of navigation support. Metrology of time and space. Abstracts of the XI symposium, Mendeleevo, 2023 г.
- [9] Chen X., Morton Y. J., Yu W. and Truong T.-K. “GPS L1CA/BDS B II Multipath Channel Measurements and Modeling for Dynamic Land Vehicle in Shanghai Dense Urban Area,” in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 14247–14263, Dec. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3038646.
- [10] Global navigation satellite system GLONASS, Open Service Performance Standard, Edition 2.2, Korolev 2019.
- [11] Zhang L., Li J., Cui T. and Liu S. “An adapted RAIM algorithm for urban canyon environment,” 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS, Harbin, China, 2017, pp. 116–121, doi: 10.1109/CPGPS.2017.8075108.
- [12] Perov A. I. One-stage algorithm of the base line orientation angle estimation from the satellite radio-navigation systems signals (in Russian) // Radiotekhnika, 2023, vol. 87, no. 11, pp. 82–94. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202311-14> (in Russian)
- [13] Korogodin I. V., Dneprov V. V. Simulation model of radio frontend and correlation channel of navigation receiver. ROSPATENT. Certificate № 2015613724 from 24.03.2015. (in Russian)
- [14] Korovin A. V. GNSS -NVO. ROSPATENT. Certificate № 2020617239 from 02.07.2020. (in Russian)
- [15] Kapulin D. V., Dmitriev D. D., Kremez N. S. Computer model of GNSS-receiver. ROSPATENT. Certificate № 2017618401 from 13.06.2017. (in Russian)

Сведения об авторах

Куликов Роман Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, директор института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова НИУ «МЭИ». Окончил НИУ «МЭИ» в 2007 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 2010 году. Область научных интересов: системы автоматического управления, радионавигационные системы.

Вишняков Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, директор института информационных и вычислительных технологий НИУ «МЭИ». Окончил НИУ «МЭИ» в 2002 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 2005 году. Область научных интересов: цифровая обработка многомерных сигналов.

Мальшев Александр Павлович – ассистент кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ». Окончил НИУ «МЭИ» в 2023 году. Область научных интересов: радионавигационные системы, оптимальная обработка сигналов, математическое моделирование.

Орлова Маргарита Андреевна – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, систем и сетей НИУ «МЭИ». Окончила НИУ «МЭИ» в 2018 году. Защитила кандидатскую диссертацию в 2022 году. Область научных интересов: вычислительные системы и комплексы, беспроводные локальные сети, виртуализация сетей и вычислительных ресурсов.

Бровко Татьяна Антоновна – ассистент кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ». Окончила НИУ «МЭИ» в 2021 году. Область научных интересов: радионавигационные системы, моделирование сложных систем.