



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-50-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 550.388.2

ОБЛИК ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ИОНОСФЕРЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ПРИЛЕГАЮЩИМИ РЕГИОНАМИ

Е. А. КАПЛЯРЧУК¹, С. В. КОЗЛОВ¹, А. М. КРОТ², И. Э. САВИНЫХ², А. С. ШАПКИН²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 31.05.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Обоснованы состав и характеристики системы низкоорбитального контроля ионосферы над территорией Республики Беларусь и прилегающими регионами земного шара. Данная система построена на базе спутников-ретрансляторов сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц, модернизированной аппаратуры приемных пунктов национальной спутниковой системы точного позиционирования, телекоммуникационных каналов общего пользования и группы серверов обработки принятых сигналов и оценивания полного электронного содержания в ионосфере. Система низкоорбитального контроля ионосферы предназначена для выдачи данных по полному электронному содержанию на трассах спутник-ретранслятор – приемный пункт спутниковой системы точного позиционирования при восстановлении электронного содержания в ионосфере методами радиотомографии. Разработаны рекомендации по орбитальным параметрам спутников-ретрансляторов, требования к бортовому ретранслятору, антенной системе и дополнительному приемному каналу аппаратуры приемных пунктов спутниковой системы точного позиционирования, определены объем циркулирующей в системе информации и требования к серверам обработки. Разработан цифровой двойник системы низкоорбитального контроля ионосферы. Показано, что предлагаемая система низкоорбитального контроля при пролете спутников-ретрансляторов по орбите над территорией Беларуси и прилегающими регионами за время 10–15 мин обеспечивает увеличение объема данных для решения радиотомографической задачи в сравнении с существующим высокоорбитальным методом на 5400 измерений с расстояниями по точкам «прокола» ионосферы порядка единиц километров в азимутальном секторе относительно условного центра системы 120°–150°.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, спутник-ретранслятор, навигационный сигнал, цифровое диаграммообразование, сервер, спутниковая система точного позиционирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по опытно-конструкторской работе по договору № 220/12 «Разработать алгоритмические и программные средства обработки радиотомографических данных низкоорбитального контроля ионосферы» (2022–2025) в рамках мероприятия подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «Научно-технологические технологии и техника» на 2021–2025 гг. и научно-исследовательской работе по договору № 9СГЗ.3-220 «Разработать аппаратно-программный и алгоритмический комплекс радиометрического анализа динамических состояний ионосферы» (2023–2026) в рамках научно-технической программы Союзного государства «Комплекс-СГ».

Для цитирования. Облик перспективной системы низкоорбитального контроля ионосферы над территорией Республики Беларусь и прилегающими регионами / Е. А. Каплярчук [и др.] // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 4. С. 50–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-50-61>.

APPEARANCE OF A PROMISING SYSTEM FOR LOW-ORBIT CONTROL OF THE IONOSPHERE OVER THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND ADJACENT REGIONS

YAUHENI A. KAPLARCHUK¹, SERGEY V. KOZLOV¹, ALEXANDER M. KROT²,
IRINA E. SAVINYKH², ALIAKSANDR S. SHAPKIN²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.05.2024

Abstract. The article substantiates the composition and characteristics of the low-orbit ionosphere monitoring system over the territory of the Republic of Belarus and adjacent regions of the globe. This system is based on satellites-repeaters of signals of the global navigation satellite system GPS on the frequencies of 150/400 MHz allocated for geophysical research, modernized equipment of receiving points of the national satellite system of precise positioning, public telecommunication channels and a group of servers for processing received signals and estimating the total electron content in the ionosphere. The low-orbit ionosphere monitoring system is designed to provide data on the total electron content on the routes repeater satellite – receiving point of the satellite system of precise positioning when restoring the electron content in the ionosphere using radio tomography methods. Recommendations have been developed on the orbital parameters of the repeater satellites, requirements for the on-board repeater, antenna system and additional receiving channel of the equipment of receiving points of the satellite system of precise positioning, the volume of information circulating in the system and the requirements for the processing servers are determined. A digital twin of the low-orbit ionosphere monitoring system has been developed. It has been shown that the proposed low-orbit monitoring system, when relay satellites fly in orbit over the territory of Belarus and adjacent regions for 10–15 minutes, provides an increase in the volume of data for solving the radiotomographic problem in comparison with the existing high-orbit method of 5400 measurements with distances at the ionosphere “puncture” points of the order of several kilometers in the azimuthal sector relative to the conventional center of the system 120°–150°.

Keywords: ionosphere, total electron content, repeater satellite, navigation signal, digital charting, server, satellite precision positioning system.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work was partially sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research under project No F20R-329 “Theoretical Foundations for the Study of Wave Processes and Phenomena in the Ionosphere Using Signals from Satellite Radio Navigation Systems”, under research and development work under contract No 220/12 “Develop algorithmic and software tools for processing radio tomographic data from low-orbit ionosphere monitoring” (2022–2025) within the framework of subprogram 6 “Exploration and Use of Outer Space for Peaceful Purposes” of the State Program “Science-Intensive Technologies and Technology” for 2021–2025 and research work under contract No 9SG3.3-220 “Develop a hardware, software and algorithmic complex for radiometric analysis of the dynamic states of the ionosphere” (2023–2026) within the framework of the scientific and technical program of the Union State “Complex-SG”.

For citation. Kaplarchuk Ya. A., Kozlov S. V., Krot A. M., Savinykh I. E., Shapkin A. S. (2024) Appearance of a Promising System of Low-Orbit Control of the Ionosphere over the Territory of the Republic of Belarus and Adjacent Regions. *Digital Transformation*. 30 (4), 50–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-50-61> (in Russian).

Введение

Разработка способов контроля состояния ионосферы методами радиочастотного зондирования – актуальная задача [1–8]. В последнее время возрастает интерес к методам получения абсолютных измерений полного электронного содержания (ПЭС) в отдельном регионе и близком к реальному масштабу времени. Это связано с требованием независимости работы систем обнаружения опасных природных явлений и обеспечения средств радиосвязи и радионавигации от глобальных ионосферных карт, большая часть которых выходит с запаздыванием в несколько дней [3, 7, 9, 10].

В [11] приведено обоснование различных вариантов перспективного способа оценивания ПЭС в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц со спутника-ретранслятора в микро- или наноформатах. Наиболее простым является вариант,

предполагающий ретрансляцию сигналов GPS на частоте $L_1 = 1575,42$ МГц, что позволяет оценивать ПЭС на трассе спутник-ретранслятор (СР) – наземный приемный пункт (ПП) с точностью не хуже 0,1 ТЕСу по разности задержек огибающих когерентных ретранслированных сигналов без необходимости устранения фазовой неоднозначности, характерной для случая излучения с малого космического аппарата немодулированных гармонических сигналов [5, 6]. В [12] приведены алгоритмы цифровой обработки ретранслированных сигналов и оценивания ПЭС.

Для практической реализации предложенного (либо аналогичных) способа необходимо создание в Республике Беларусь системы низкоорбитального контроля ионосферы (НКИ). Обоснование состава и структуры такой системы рассмотрено в статье.

Состав и структура перспективной системы низкоорбитального контроля ионосферы

Система НКИ над территорией Беларуси и прилегающими регионами земного шара предназначена для:

- приема ретранслированных на частоты 150/400 МГц навигационных сигналов ГНСС GPS наземными приемными пунктами спутниковой системы точного позиционирования (ССТП) Республики Беларусь [13] с дополнительными каналами приема;
- передачи принятых сигналов на сервер обработки и измерения ПЭС на трассах распространения между СР и ПП ССТП;
- архивации, хранения и выдачи по соответствующим запросам данных об измеренных значениях ПЭС внешним потребителям;
- контроля состояния и измерения орбитальных параметров группировки СР и организации управления ими.

Структура системы НКИ совместно с внешними связями приведена на рис. 1 (ЦОИиУ – центр обработки информации и управления; АРМ – автоматизированное рабочее место; БД – база данных; НС – навигационный спутник).

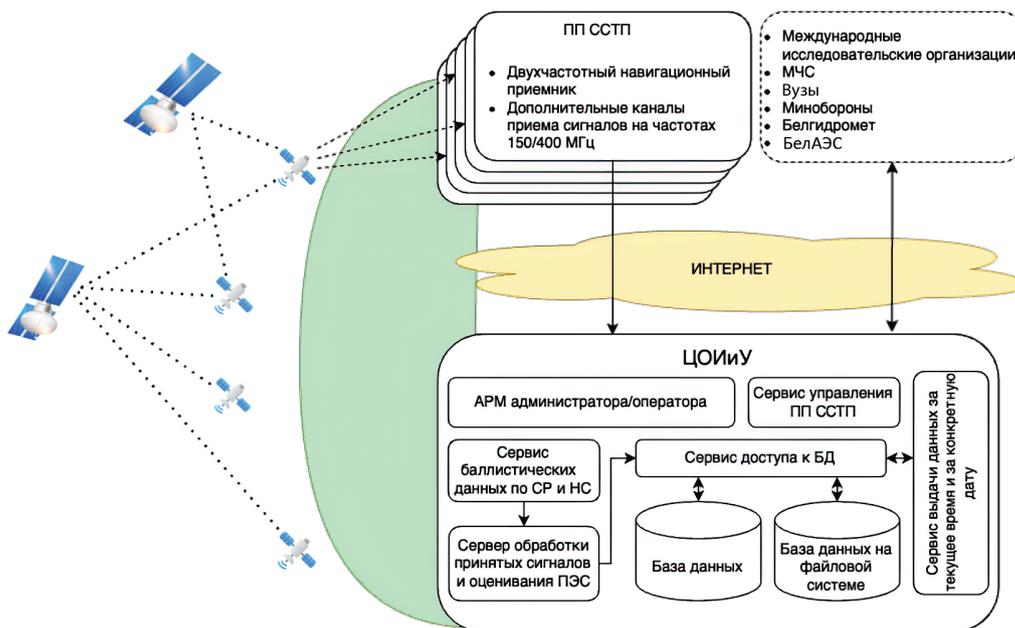


Рис. 1. Структура системы низкоорбитального контроля ионосферы
Fig. 1. Structure of the low-orbit ionospheric monitoring system

В состав системы входят:

- группировка из 4–48 низкоорбитальных СР (малых космических аппаратов) с бортовой аппаратурой ретрансляции сигналов ГНСС GPS на частоты 150/400 МГц;
- сеть наземных ПП ССТП с дополнительными каналами приема ретранслированных сигналов 150/400 МГц, их преобразования в цифровую форму и передачи на ЦОИиУ;
- ЦОИиУ в составе сервера обработки принятых сигналов и оценивания ПЭС, сервера архивации результатов измерений и файлового сервера для выдачи данных потребителям, пунктов;
- общедоступные телекоммуникационные каналы передачи данных сети Белтелеком.

Основой для системы НКИ являются ПП ССТП, дополненные каналами приема ретранслированных сигналов. В настоящее время общее число ПП ССТП составляет 99, их география (треугольники) приведена на рис. 2 (<https://map.nca.by/layers>).

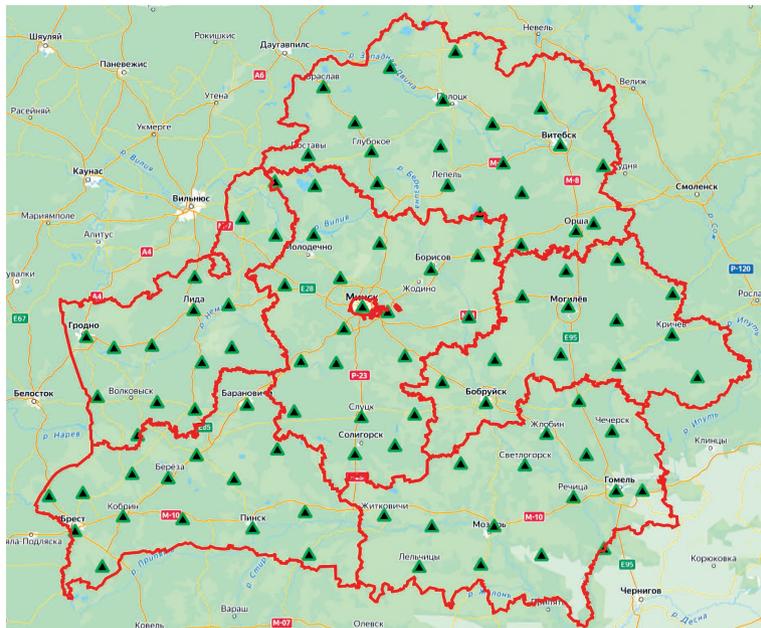


Рис. 2. Размещение приемных пунктов спутниковой системы точного позиционирования
Fig. 2. Placement of receiving stations of the satellite precision positioning system

Оснащение всех ПП ССТП дополнительными каналами приема является, очевидно, избыточным. Исходя из необходимости обнаружения локальных флуктуаций электронной концентрации в ионосфере диаметром 30–50 км, расстояние между ПП ССТП с дополнительными каналами приема с учетом характерной высоты максимума электронной концентрации в ионосфере 300 км и высоты орбиты СР 500–1000 км может быть принято 50–70 км. С учетом экономических ограничений на первом этапе создания системы НКИ общее число ПП ССТП, оснащенных дополнительным каналом приема, может составить 16–20, т. е. примерно 1/5 от имеющихся в составе ССТП.

Функционирование системы НКИ при проведении измерений ПЭС осуществляется следующим образом:

- ЦОИиУ на основе накопленных на предыдущих этапах функционирования данных об орбитальных параметрах СР прогнозирует моменты входа СР в зону прямой видимости с ПП ССТП, по каналам связи выдает команду на включение дополнительных каналов приема сигналов 150/400 МГц и задает интервал времени включения;

- дополнительные каналы приема осуществляют прием сигналов в заданный временной интервал и с заданных азимута/угла места, перевод принимаемых сигналов в цифровую форму с формированием формализованных файлов отчетов сигналов и передают их на ЦОИиУ;

- ЦОИиУ осуществляют обработку принятых файлов отчетов сигналов, в ходе которой решаются задачи по обнаружению сигналов от каждого видимого НС GPS в составе ретранслированных сигналов, измерению разности времен задержки по каждому НС, оцениванию и усреднению ПЭС на трассе СР – ПП по всем видимым НС;

- результаты оценивания в составе момента времени получения ПЭС, номера ПП ССТП, координат СР и непосредственно оценки ПЭС на трассе СР – ПП ССТП поступают на архивацию;

- дополнительно ЦОИиУ в каждом измерении по каждому НС оценивает суммарную дальность НС – СР – ПП ССТП с учетом компенсации ионосферной ошибки;

- по результатам измерений суммарной дальности по видимым навигационным спутникам решается задача разовой оценки местоположения СР;

- по совокупности разовых оценок координат СР на интервале наблюдения решается задача оценивания (уточнения) орбитальных параметров СР; результаты оценивания используются для прогнозирования последующего момента наблюдения СР с ПП ССТП.

Функционирование ЦОИиУ системы НКИ при выдаче информации потребителям заключается в приеме формализованного запроса, содержащего начальный и конечный моменты времени

выдачи данных о ПЭС, поиска соответствующей информации в БД и формировании выходного файла с результатами.

Рекомендации по орбитальным параметрам спутников-ретрансляторов

При выборе числа и орбитальных параметров СР учитывается, что при увеличении высоты орбиты происходит увеличение зоны видимости СР с ПП ССТП, угловых размеров зоны измерения ПЭС и числа видимых с ПП ССТП проходов СР в сутки, но при этом уменьшаются отношение сигнал/шум и точность измерения ПЭС. Для обоснования требований к орбитальным параметрам и числу СР на орбитах удобно использовать показатель «пространственная доступность», под которым понимается вероятность приема сигнала от СР хотя бы одной приемной станцией ССТП в произвольный момент времени.

Пространственная доступность ограничена как выпуклостью (кривизной) Земли с учетом минимального угла маски (угла между местным горизонтом и направлением на спутник, который обычно принимается 5°), так и параметрами антенн СР. Для оценки пространственной доступности используется следующее выражение:

$$w_{\text{пд}} = \frac{2\pi R_e^2 (1 - \cos \psi)}{4\pi R_e^2} = \frac{1 - \cos \psi}{2}, \quad (1)$$

где R_e – радиус Земли; ψ – половина центрального угла, ограничивающего зону видимости СР (рис. 3).

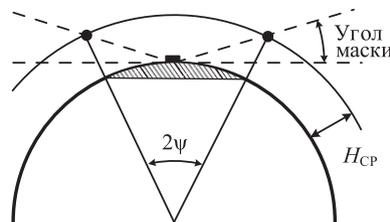


Рис. 3. К определению пространственной доступности
Fig. 3. Toward the definition of spatial accessibility

В формуле (1) до сокращения числитель $2\pi R_e^2 (1 - \cos \psi)$ представляет собой площадь сегментной поверхности сферического сегмента высотой $H = R_e - R_e \cos \psi = R_e (1 - \cos \psi)$, на которую попадает подспутниковая точка при нахождении СР в пределах прямой видимости с центральной станцией ССТП, знаменатель $4\pi R_e^2$ – общую площадь поверхности Земли.

Значения пространственной доступности СР и другие числовые данные для угла маски 5° приведены в табл. 1, из которых следует, что для повышения пространственной доступности необходимо увеличивать высоту орбиты и ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны 150/400 МГц при условии, что максимум главного лепестка ориентирован в надир. Практическая реализация антенн с шириной главного лепестка 120° – 130° затруднительна, что определяет необходимость изменения угловой ориентации СР при прохождении им участка орбиты в зоне видимости ПП ССТП.

Таблица 1. Пространственная доступность спутника ретранслятора
Table 1. Spatial accessibility of the relay satellite

Высота орбиты, км	Половина центрального угла ψ , град.	Максимальная дальность, км	Максимальный угол между направлением в надир и на ПП, град.	Пространственная доступность	
				без учета ширины главного лепестка антенны ретранслятора	при ширине главного лепестка антенны ретранслятора 90°
500	$17,3^\circ$	2076	$67,0^\circ$	0,0232	0,0017
800	$22,7^\circ$	2782	$62,7^\circ$	0,0389	0,0046
1000	$25,4^\circ$	2841	$59,4^\circ$	0,0483	0,0074
1200	$28,0^\circ$	3117	$57,0^\circ$	0,0587	0,0112

Ориентировочное число СР при примерно равномерном распределении их орбит по долготе восходящего узла, необходимое для достижения близкой к единице вероятности наблюдения хотя бы одного СР, составит 25–20 для высот орбит 800–1000 км.

Для высоты орбиты 1000 км и нахождении СР на максимальной дальности «точки прокола» ионосферы при типовой высоте слоя с максимальной концентрацией электронов 300 км будут расположены на удалении по поверхности Земли примерно 800–850 км с характерными локациями по окружности против часовой стрелки: Братислава, Запорожье, Владимир, Хельсинки. С учетом указанной максимальной дальности максимальная северная широта спутника может составлять 78°–80°, что определяет рациональные значения угла наклона плоскости орбиты 90°–102°.

Характеристики бортового ретранслятора

Требуемые параметры бортового ретранслятора определяются необходимостью достижения заданного отношения сигнал/шум с учетом конструктивных ограничений по размещению приемных и передающих антенн. Уточненные в сравнении с [11] характеристики бортового ретранслятора приведены в табл. 2.

Таблица 2. Требуемые характеристики бортового ретранслятора
Table 2. Required characteristics of an onboard repeater

Наименование характеристики	Значение характеристики
Выходная мощность в линейном режиме по 3 дБ компрессии, дБм	23 ± 1
Коэффициент усиления тракта ретрансляции K_p по мощности, дБ	127 ± 1
Коэффициент шума $k_{ш}$ входного малошумящего усилителя, дБ	1–2
Диапазон рабочих частот, МГц	1575,42 ± 1 – по входу; 150 ± 1 и 400 ± 1 – по выходу
Приемная антенна сигнала L_1 GPS	Микрополосковая антенна диаметром 70–80 мм с коэффициентом усиления в зените 4,0–4,5 дБ
Передающие антенны каналов 150/400 МГц	Четвертьволновый штыврь (в транспортном состоянии – свернутый), вибраторная антенна (для 400 МГц) или микрополосковая антенна с коэффициентом усиления в секторе ±60° относительно максимума не менее 1 дБ

Характеристики дополнительных приемных каналов приемной станции спутниковой системы точного позиционирования

Дополнительные приемные каналы ПП ССТП должны обеспечить прием сигналов на частотах 150/400 МГц с произвольной эллиптической поляризацией в секторе 360° по азимуту и 5°–90° по углу места на двух ортогональных поляризациях и преобразование принятых сигналов в цифровую форму с последующей передачей принятых сигналов на ЦОИиУ. Направление приема полезного сигнала является известным с высокой точностью, а его поляризационные характеристики – случайные из-за фарадеевского вращения плоскости поляризации в ионосфере [14].

Анализ возможных вариантов построения дополнительных приемных каналов показывает, что наиболее экономное из них – использование антенной системы в виде шестиэлементной кольцевой антенной решетки (КАР) из горизонтально и вертикально ориентированных антенных элементов (АЭ) – полуволновых вибраторов. Геометрия КАР на частоту 150 МГц приведена на рис. 4, *b*, где выколотыми кружками показаны вертикальные вибраторы. Геометрия КАР на частоту 400 МГц аналогична при пропорционально меньших размерах, причем КАР на частоту 400 МГц «встраивается» в КАР на частоту 150 МГц с разнесом по высотам фазовых центров порядка 1 м для исключения взаимного влияния АЭ. Такие КАР требуют фокусировки в направлении на СР с учетом поляризации полезного сигнала. Выполнение этих операций непосредственно в дополнительной аппаратуре ПП ССТП сопряжено с существенными аппаратурными затратами. Поэтому для системы НКИ предлагается вариант передачи цифровых сигналов, принятых всеми 12-ю приемными каналами на каждой из частот, на ЦОИиУ с реализацией цифрового диаграммообразования и поляризационной адаптации в программном виде на ЦОИиУ.

Требуемые характеристики дополнительных приемных каналов приемной станции ССТП приведены в табл. 3.

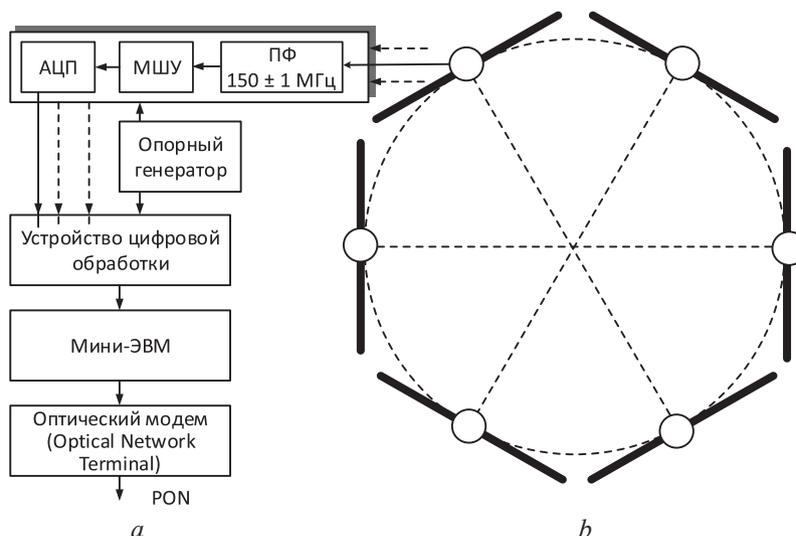


Рис. 4. Структура дополнительной аппаратуры приемных пунктов спутниковой системы точного позиционирования (а) и вид сверху (b)
Fig. 4. The structure of additional equipment of the receiving points of the satellite precision positioning system (a) and top view (b)

Таблица 3. Требуемые характеристики дополнительных приемных каналов приемной станции
Table 3. Required characteristics of additional receiving channels of the receiving station

Наименование характеристики	Значение характеристики
Число приемных каналов для вертикальной/горизонтальной поляризации	6/6 – для частот 150 и 400 МГц
Радиус кольцевой антенной решетки	1,000 м – для 150 МГц; 0,375 м – для 400 МГц
Коэффициент шума входного малошумящего усилителя, дБ	1–2
Диапазон рабочих частот, МГц	150 ± 1; 400 ± 1
Частота дискретизации, МГц	1,5
Число разрядов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (со знаковым) для каждой квадратурной составляющей	4

Структура одного приемного канала показана на рис. 4, а. Для частоты 150 МГц он содержит входной полосно-пропускающий фильтр (150 ± 2) МГц, малошумящий усилитель (МШУ), бесквадратурный АЦП с частотой дискретизации десятки мегагерц с преобразованием сигналов в соответствующей зоне Найквиста и устройства цифровой обработки. Устройство цифровой обработки выполняет функции преобразования действительного цифрового сигнала в квадратурный с одновременной фильтрацией в пределах квадратурных составляющих в полосе порядка 0,5 МГц, децимации, усечения разрядности и упаковки отсчетов квадратурных составляющих сигнала в один байт. Сформированный цифровой поток по Ethernet поступает на управляющую мини-ЭВМ для буферизации и передачи по каналам связи на ЦОИиУ.

Оценим требуемую пропускную способность каналов связи между приемной станцией ССТП и ЦОИиУ и требуемый объем памяти для хранения цифровых сигналов при невозможности обеспечения передачи данных в реальном масштабе времени или при нарушениях связи. При указанных в табл. 3 параметрах общий цифровой поток от приемной станции ССТП составит за 1 с приема сигналов $6 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 3,6 \cdot 10^7$ байт = 34,33 Мбайт. Для сокращения объема передаваемых сигналов будем полагать, что относительное время приема – порядка 0,5: например, 1 с – прием и 1 с – пауза. Тогда общий объем записываемых сигналов за время видимости спутника (в среднем – около 12 мин) составит примерно 12 Гбайт. Передача такого объема данных в масштабе времени, близком к реальному, потребует скорости передачи данных на уровне 120 Мбит/с, что является стандартным для каналов связи по стандарту PON.

Оценка отношения сигнал/шум и точности измерения полного электронного содержания

Отношение сигнал/шум γ по одному периоду навигационного сигнала GPS ($T_0 = 1$ мс) на выходе приемного канала и отношение сигнал/шум ρ при заданном времени когерентного накопления T_n после цифрового диаграммообразования оценивались для указанных выше параметров системы НКИ по следующим расчетным соотношениям [11]:

$$\gamma_{1(2)} = \frac{P_{\text{gps}} G_{\text{gps}} G_{r_{\text{gps}}} G_{tr} G_{\text{шт}} \lambda_{\text{gps}}^2 \lambda_{150(400)}^2 T_0}{(4\pi)^4 R_{\text{нс-ср}}^2 R_{\text{ср-шт}}^2 k_{\text{шт}} k_{\text{Б}} T} K_p; \quad (2)$$

$$\rho_{1(2)} = \gamma_{1(2)} N_{\text{дл}} \frac{T_n}{T_0}, \quad (3)$$

где $P_{\text{gps}} = 25$ Вт – мощность излучения навигационного спутника на частоте L_1 (с учетом разделения между частотами L_1 и L_2); $G_{\text{gps}} \approx 50$, $G_{r_{\text{gps}}} \approx 2$, $G_{tr} \approx 2$, $G_{\text{шт}} \approx 1,5$ – коэффициенты усиления антенны навигационного спутника, приемной антенны навигационного сигнала, передающей антенны ретранслированного сигнала и вибратора КАР соответственно; $\lambda_{\text{gps}} = 0,19$ м – длина волны навигационного сигнала; $\lambda_{150} = 2,00$ м, $\lambda_{400} = 0,75$ м – длина волны ретранслированных сигналов; $T = 300$ К – температура приемного тракта приемной станции ССТП; $k_{\text{Б}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $R_{\text{нс-ср}} = 21$ тыс. км – среднее расстояние между НС и СР; $R_{\text{ср-шт}} = 1,5$ тыс. км – среднее расстояние СР – ПП при высоте орбиты 1000 км; $N_{44} \approx 4$ – эффективное число приемных каналов в шестизаэлементной КАР при цифровом диаграммообразовании, равное отношению коэффициента усиления КАР к коэффициенту усиления одного диполя.

Для указанных исходных данных $\gamma_1 = 11,0$ дБ, $\gamma_2 = 2,5$ дБ и $\rho_1 = 44,5$ дБ, $\rho_2 = 36,0$ дБ, среднеквадратическая ошибка оценки ПЭС в единичном измерении определяется согласно формуле [11]

$$\sigma_{\text{ПЭС}} = \sqrt{\frac{140}{N_{\text{нс}}} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)} [\text{ТЕС}u], \quad (4)$$

где $N_{\text{нс}} = 7$ – число видимых навигационных спутников.

Для приведенных характеристик $\sigma_{\text{ПЭС}} = 0,07$ ТЕСu.

Требования к аппаратным и программным средствам центра обработки информации и управления

ЦОИиУ состоит из телекоммуникационного оборудования, сервера обработки сигналов и почтового сервера. ЦОИиУ в алгоритмическом виде решает следующие задачи:

- запрос и прием данных от центра контроля и управления ГНСС GPS по эфемеридам навигационных спутников GPS и прогнозирование местоположения навигационных спутников для произвольного момента времени;
- вычисление (уточнение) орбитальных параметров спутников-ретрансляторов, вычисление текущих координат СР, дальности, азимута и угла места наблюдения СР с приемных станций ССТП;
- определение моментов начала и окончания приема сигналов от СР на ССТП и номеров спутников GPS, видимых одновременно с СР и ССТП; расчет доплеровских сдвигов частот принимаемых сигналов;
- выдачу информации о моментах вхождения СР в зону приема сигналов на ССТП и продолжительности сеанса связи;
- прием данных (отсчетов сигналов), поступающих по каналам интернета от приемных станций ССТП, и их буферизация на SSD;
- внутрипериодную обработку принятых на частотах 150/400 МГц сигналов по всем приемным станциям ССТП, приемным каналам, видимым навигационным спутникам и каналам по доплеровскому сдвигу частоты с учетом неконтролируемых сдвигов частоты гетеродинов аппаратуры ретрансляции и дополнительного приемного канала ССТП;
- оценивание весовых коэффициентов приемных каналов, максимизирующих отношение сигнал/шум на выходе системы обработки;
- цифровое диаграммообразование сигнала суммарного канала из результатов внутрипериодной обработки по всем приемным станциям ССТП и всем видимым НС;

- компенсацию миграции дальности и частоты и когерентное накопление принятого сигнала по всем ССТП и всем навигационным спутникам;
- оценивание разности времени задержки сигналов 150/400 МГц, пересчет в оценку ПЭС на трассах СР – ССТП и усреднение оценок по всем видимым НС [11];
- оценивание координат СР в разовых измерениях и уточнение на этой основе его орбитальных параметров.

Требуемые характеристики вычислительных и программных средств ЦОИиУ приведены в табл. 4.

Таблица 4. Требуемые характеристики вычислительных и программных средств центра обработки информации и управления
Table 4. Required characteristics of computing and software facilities of the information processing and control center

Наименование характеристики	Значение характеристики
Входящие каналы	До 12 каналов xPON с пропускной способностью не менее 1 Гбит/с
Исходящие каналы	1 канал с пропускной способностью 1 Гбит/с
Сервер обработки принятых сигналов и оценивания ПЭС	Процессор Intel Core i9-14900KS (24 ядра, 32 потока) или аналоги от Ryzen + внешняя GPU серии 4080/4090 + RAM 32ГБ DDR5 и выше + NVMe SSD от 2ТБ
Сервер выдачи данных за текущее время и за конкретную дату	Процессор Intel Core i7-13700K (16 ядер, 24 потока) или аналоги от Ryzen + RAM 32ГБ DDR4/DDR5 + NVMe SSD от 2ТБ
База данных	PostgreSQL, 16-ядерный процессор (например, Intel Xeon или AMD EPYC), 4x NVMe SSD в RAID 10 (для повышения скорости чтения/записи и отказоустойчивости), ОЗУ от 16ГБ
База данных на файловой системе	Процессор Intel Core i7 или AMD Ryzen 7, 16ГБ RAM, SQLite

Оценка возможностей предлагаемой системы низкоорбитального контроля ионосферы

Для оценки возможностей предлагаемой системы НКИ разработан ее цифровой двойник. Цифровой двойник воспроизводит перемещение группы СР и НС по заданным орбитам, перемещение приемных станций ССТП вследствие вращения Земли, определение взаимного пространственного положения и видимости приемных станций, СР и НС и другие пространственные параметры, а также имитирует распределение полной электронной концентрации в ионосфере и результаты оценивания ПЭС на трассах СР – ПП за заданное время наблюдения. На рис. 5 показана полученная с использованием цифрового двойника типовая ситуация пролета СР вблизи территории Беларуси за 15 мин.

Положение СР на рис. 5, а показано прямоугольником белого цвета (1), если СР находится вне зоны видимости, и черного цвета (2, 3, 4), если он в зоне видимости. Цифрами 1–4 обозначены последовательные положения СР на орбите. Положение ПП ССТП показано желтыми точками, а одного из НС GPS в начальный и конечный моменты времени – круглыми маркерами. Вертикальная диаграмма иллюстрирует кодировку вертикально ПЭС в градациях яркости. На рис. 5, б показана зависимость измеренных ПЭС от времени.

Сектор приема сигнала от СР и измерения ПЭС для произвольного ПП ССТП по азимуту превышает 150°. Пренебрегая вращением Земли, что за указанное время наблюдения вполне допустимо, измерения ПЭС для одного ССТП располагаются на части боковой поверхности конуса с вершиной в точке расположения ССТП и образующей, представляющей собой участок орбиты СР. Общее число измерений для одного ССТП при периодичности измерений 2 составляет 450. При модернизации для приема ретранслированных сигналов 12-ти ССТП будет получено 5400 измерений ПЭС, располагающихся в соответствующем числе сечений. Сектор приема сигнала от НС значительно уже и составляет 8°–15° при общем секторе измерений ПЭС в пределах 100°–150°. Таким образом, данные от системы НКИ существенно увеличивают объем информации для решения томографической задачи.

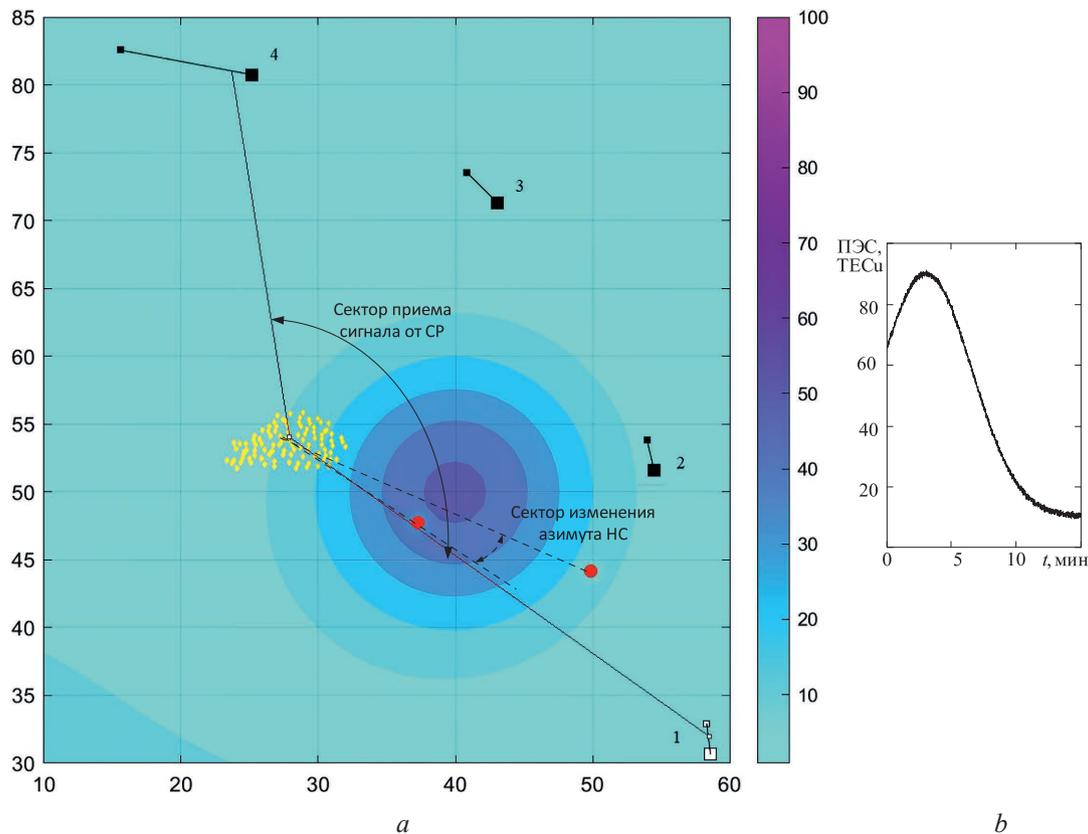


Рис. 5. Результаты моделирования пространственной ситуации и измерения полного электронного содержания

Fig. 5. Results of modeling the spatial situation and measuring the total electron content

Заключение

Предлагаемые состав, структура и характеристики системы низкоорбитального контроля ионосферы обеспечивают оперативное и высокоточное определение полного электронного содержания в широких угловых секторах в полностью автоматическом режиме и при переносе основных этапов обработки, включая цифровое диаграммообразование основных приемных каналов в круговых антенных решетках приемных пунктов спутниковой системы точного позиционирования и поляризационную адаптацию на едином сервере.

Список литературы

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. М.: Физматлит, 2007.
2. Афраймович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Первалова. Иркутск: Вост.-Сиб. науч. центр Сиб. отд. Рос. акад. мед. наук, 2006.
3. Ясюкевич, Ю. В. Развитие диагностических возможностей приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга состояния ионосферы и коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах / Ю. В. Ясюкевич. Иркутск: Ин-т солн.-зем. физики Сиб. отд. Рос. акад. наук, 2023.
4. Семейство наноспутников изучения ионосферы на базе платформы SamSat разработки Самарского университета / И. В. Белоконов [и др.] // Восьмой Белорусский космический конгресс: матер. конгресса, в 2 т., г. Минск, 25–27 октября 2022 г. Минск: Объед. ин-т пробл. информ. Нац. акад. наук Беларуси, 2022. Т. 1. С. 167–170.
5. Application of FORMOSAT-3/COSMIC Mission to Global Earth Monitoring / C.-J. Fong [et al.] // Space 2005, Long Beach, California, 30 Aug.–1 Sept. 2005. Long Beach, 2005. <https://doi.org/10.2514/6.2005-6774>.

6. Романов, А. А. Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала / А. А. Романов, А. В. Новиков // Вопросы электромеханики: тр. НИИ «Всерос. Науч.-иссл. ин-т электромех.». М.: Всерос. Науч.-иссл. ин-т электромех., 2009. Т. 111. С. 31–36.
7. Determination of Total Electron Content in the Ionosphere over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data / A. O. Naumov [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series. 2024. Vol. 69, No 1. P. 53–64.
8. Methods and Software for Estimation of Total Electron Content in Ionosphere Using GNSS Observations / A. Naumov [et al.] // Engineering Applications. 2023. Vol. 2, No 3. P. 243–253.
9. Accuracy of Global Ionosphere Maps in Relation to Their Time Interval / B. Milanowska [et al.] // Remote Sens. 2021. No 13.
10. Wang, Y. Estimation and Analysis of GNSS Differential Code Biases (DCBs) Using a Multi-Spacing Software Receiver / Y. Wang, L. Zhao, Y. Gao // Sensors (Basel). 2021. Vol. 21, No 2.
11. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 2. С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>.
12. Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере / Е. А. Каплярчук [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 3. С. 21–36. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36>.
13. Руководство по использованию глобальных навигационных спутниковых систем при выполнении работ по технической инвентаризации и проверке характеристик недвижимого имущества. Версия 1.0. Минск: Науч.-произв. гос. респ. предпр. «Нац. кадастр. агентс.», 2018.
14. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере, пер. с англ. / К. Дэвис. М.: Мир, 1973.

References

1. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. (2007) *Radiotomography of the Ionosphere*. Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
2. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. (2006) *GPS Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere*. Irkutsk, East Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (in Russian).
3. Yasyukevich Yu. V. (2023) *Development of Diagnostic Capabilities of Signal Receivers of Global Navigation Satellite Systems for Monitoring the State of the Ionosphere and Correcting Ionospheric Errors in Radio Systems*. Irkutsk, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
4. Belokonov I. V., Boltov E. A., Elisov N. A., Lomaka I. A., Nikolaev P. N., Shafran S. V. (2022) Family of Nanosatellites for Studying the Ionosphere Based on the SamSat Platform Developed by Samara University. *Eighth Belarusian Space Congress, Materials of the Congress, Vol. 1, Oct. 25–27*. Minsk, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. 167–170 (in Russian).
5. Chen-Joe Fong, Bor-Han Wu, Nick Yen, Paul Chen (2005) Application of FORMOSAT-3/COSMIC Mission to Global Earth Monitoring. *Space 2005, Long Beach, California, 30 Aug.–1 Sept. Long Beach*. <https://doi.org/10.2514/6.2005-6774>.
6. Romanov A. A., Novikov A. V. (2009) Measurement of the Total Electron Content of the Earth's Ionosphere Using a Multi-Frequency Coherent Sounding Signal. *Problems of Electromechanics, Tr. Scientific and Production Enterprise "All-Russian Research Institute of Electromechanics", Vol. 111*. Moscow, Scientific and Production Enterprise "All-Russian Research Institute of Electromechanics". 31–36 (in Russian).
7. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. (2024) Determination of Total Electron Content in the Ionosphere over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 69 (1), 53–64.
8. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrouski M. (2023) Methods and Software for Estimation of Total Electron Content in the Ionosphere Using GNSS Observations. *Engineering Applications*. 2 (3), 243–253.
9. Milanowska B., Wielgosz P., Krypiak-Gregorczyk A., Jarmołowski W. (2021) Accuracy of Global Ionosphere Maps in Relation to Their Time Interval. *Remote Sens*. (13).
10. Wang Y., Zhao L., Gao Y. (2021). Estimation and Analysis of GNSS Differential Code Biases (DCBs) Using a Multi-Spacing Software Receiver. *Sensors (Basel)*. 21 (2).
11. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kapliarchuk Y. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. (2023) A Method for Estimating the Total Electron Content in the Ionosphere Based on the Retransmission of Signals from the Global Navigation Satellite System GPS. *Informatics*. 20 (2), 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27> (in Russian).
12. Kapliarchuk Y. A., Kozlov S. V., Savinykh I. E., Shapkin A. S. (2023) Processing of Relayed Navigation Signals of the Global Navigation Satellite System GPS in the Problem of Estimating the Total Electron Content in the Ionosphere. *Informatics*. 20 (3), 21–36. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36> (in Russian).

13. *Guidelines for the Use of Global Navigation Satellite Systems when Performing Work on Technical Inventory and Checking the Characteristics of Real Estate. Version 1.0.* Minsk, Scientific and Production State Republican Enterprise “National Cadastral Agency”, 2018 (in Russian).
14. Davies K. (1969) *Ionospheric Radio Waves*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Каплярчук Е. А. обосновал требования к аппаратуре и каналам связи.

Козлов С. В. предложил концепции построения системы низкоорбитального контроля ионосферы и цифрового двойника.

Крот А. М. разработал алгоритм оценки полного электронного содержания ионосферы и определил роль системы низкоорбитального контроля ионосферы в общей структуре средств исследования ионосферы.

Савиных И. Э. выполнила оценку возможностей системы низкоорбитального контроля ионосферы.

Шапкин А. С. принял участие в разработке цифрового двойника и выполнил его моделирование.

Authors' contribution

Kaplarchuk Ya. A. substantiated the requirements for equipment and communication channels.

Kozlov S. V. proposed concepts for constructing a low-orbit ionosphere monitoring system and a digital twin.

Krot A. M. developed an algorithm for assessing the total electron content of the ionosphere and determined the role of the low-orbit ionosphere monitoring system in the overall structure of ionosphere research tools.

Savinykh I. E. assessed the capabilities of the low-orbit ionosphere monitoring system.

Shapkin A. S. took part in developing the digital twin and performed its modeling.

Сведения об авторах

Каплярчук Е. А., инж.-програм., фрилансер

Козлов С. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Крот А. М., д-р техн. наук, проф., зав. лаб. самоорганизующихся систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси)

Савиных И. Э., магистрант, инж.-програм. лаб. самоорганизующихся систем, ОИПИ НАН Беларуси

Шапкин А. С., асп., ОИПИ НАН Беларуси

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-11
E-mail: kozlov@bsuir.by
Козлов Сергей Вячеславович

Information about the authors

Kaplarchuk Ya. A., Software Engineer, Freelancer

Kozlov S. V., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Krot A. M., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Laboratory of Self-Organizing Systems, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAS of Belarus)

Savinykh I. E., Master's Student, Software Engineer at the Laboratory of Self-Organizing Systems, UIIP NAS of Belarus

Shapkin A. S., Graduate Student, UIIP NAS of Belarus

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-11
E-mail: kozlov@bsuir.by
Kozlov Sergey Vyacheslavovich