

**СОСТАВ, СТРУКТУРА И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ИОНОСФЕРЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ПРИЛЕГАЮЩИМИ РЕГИОНАМИ**

Е. А. КАПЛЯРЧУК<sup>1</sup>, С. В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, А. М. КРОТ<sup>2</sup>, И. Э. САВИНЫХ<sup>2</sup>, А. С. ШАПКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Беларусь)*

<sup>2</sup> *Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси  
(г. Минск, Беларусь)*

*E-mail: kozlov@bsuir.by*

**Аннотация.** В статье рассматривается проект системы низкоорбитального контроля ионосферы, предназначенной для мониторинга ионосферных процессов над территорией Беларуси и прилегающими регионами с использованием спутников-ретрансляторов формата CubeSat. Система предполагает ретрансляцию сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS на частоты 150/400 МГц, специально выделенные для геофизических исследований. В структуру системы включены модернизированные приемные станции национальной спутниковой системы точного позиционирования, телекоммуникационные каналы общего пользования и серверы обработки данных, что позволяет оценивать полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере и архивировать результаты для дальнейшего использования потребителями. Описаны методы проектирования и структурная схема системы, а также представлен облик системы контроля.

**Abstract.** The article presents a project for a low Earth orbit ionospheric monitoring system designed to observe ionospheric processes over Belarus and adjacent regions using CubeSat-format relay satellites. The system involves retransmitting signals from the Global Navigation Satellite System (GNSS) GPS to frequencies of 150/400 MHz, allocated specifically for geophysical research. The system architecture includes upgraded receiving stations of the national satellite-based precise positioning system, public telecommunication channels, and a group of data processing servers, allowing for the assessment of the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere and archiving the results for further use by consumers. The article describes the design methods, structural scheme, and an overall layout of the proposed monitoring system.

**Введение**

Разработка методов контроля состояния ионосферы методами радиочастотного зондирования является весьма актуальной [1-5]. В последнее время возрастает интерес к методам получения абсолютных измерения ПЭС в каком-то отдельном регионе и близком к реальному масштабу времени [2]. 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.

В [6] приведено обоснование различных вариантов перспективного способа оценивания ПЭС в ионосфере на основе ретрансляции сигналов ГНСС GPS на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц с наноспутника-ретранслятора. Наиболее простым является вариант способа, предполагающий ретрансляцию сигналов GPS на частоте  $L_1$  1575,42 МГц, что позволяет оценивать ПЭС на трассе НР-наземный приемный пункт 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. В [7] приведены алгоритмы цифровой обработки ретранслированных сигналов и оценивания ПЭС.

Для практической реализации предложенного либо аналогичных способов необходимо создание в Республике Беларусь системы НКИ на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS. Обоснование состава и структуры такой системы и является целью настоящей статьи.

**Состав и структура перспективной системы низкоорбитального контроля ионосферы**

Система НКИ над территорией РБ и прилегающими регионами земного шара на основе ретрансляции сигналов GPS с наноспутника-ретранслятора предназначена для решения следующих задач:

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2024»

Открытая республиканская научно-практическая интернет-конференция,  
21-22 ноября 2024 г., Минск, Республика Беларусь

приема ретранслированных на частоты 150/400 МГц навигационных сигналов ГНСС GPS наземными приемными пунктами ССТП РБ [8] с дополнительными каналами приема; передаче принятых сигналов на сервер обработки и измерения ПЭС на трассах распространения между СР и ИП 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.

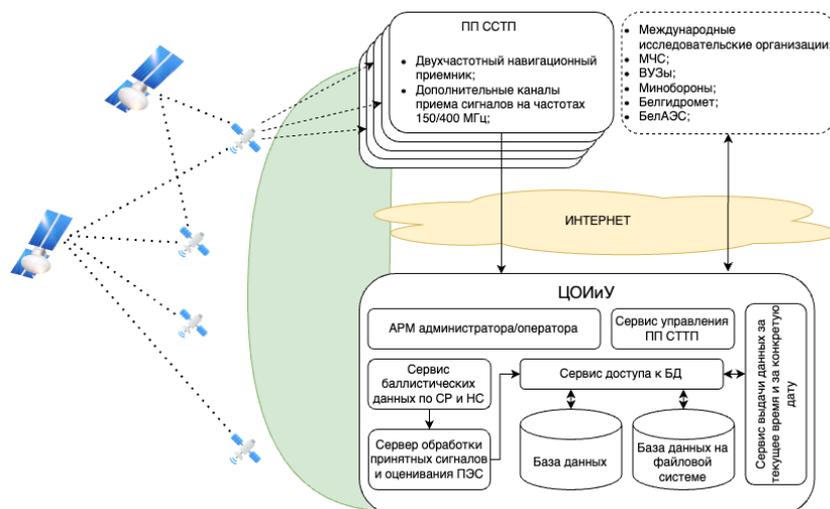


Рис. 1. Структура системы низкоорбитального контроля ионосферы

В состав системы входят:

группировка из 4...48 НР на орбитах высотой 800 -1000 км с бортовой аппаратурой ретрансляции сигналов ГНСС GPS на частоты 150/400 МГц;

сеть наземных приемных пунктов ССТП с дополнительными каналами приема ретранслированных сигналов 150/400 МГц, их преобразования в цифровую форму и передачи на центр обработки информации и управления;

центр обработки информации и управления (ЦОИиУ) в составе сервера обработки принятых сигналов и оценивания ПЭС, сервера архивации результатов измерений и файлового сервера для выдачи данных потребителям;

общедоступные телекоммуникационные каналы передачи данных сети Белтелеком.

Основой для системы НКИ являются приемные пункты (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>).

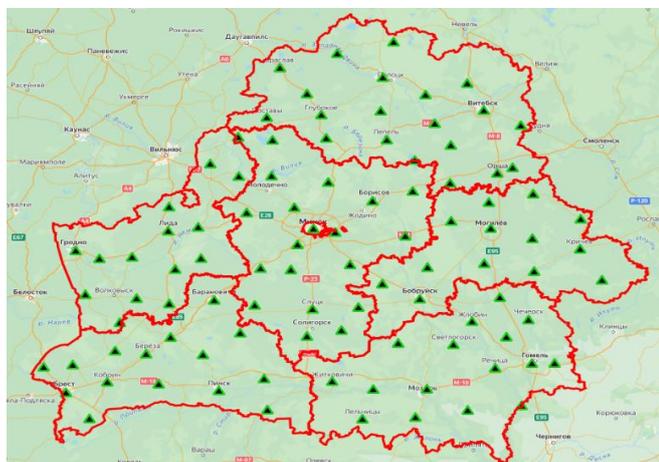


Рис. 2. Размещение приемных пунктов спутниковой системы точного позиционирования

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 высоты ионосфер 300 км и высоты орбиты СР 500...1000 км может быть принято 50...70 км. Это определяет общее число ПП ССТП, оснащаемых дополнительным каналом приема с учетом экономических ограничений, порядка 16...20, то есть 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 НР прогнозирует моменты входа НР 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 заданным азимута/угла места, перевод принимаемых сигналов в цифровую форму с формированием формализованных файлов отсчетов сигналов и передают их на ЦОИиУ;

ЦОИиУ осуществляют обработку принятых файлов отсчетов сигналов, в ходе которой решаются задачи по обнаружению сигналов от каждого видимого навигационного спутника 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-НР-ПП ССТП» с учетом компенсации ионосферной ошибки;

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

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

Функционирование ЦОИиУ системы НКИ при выдаче информации потребителям заключается в приеме формализованного запроса, содержащего начальный и конечный момент времени выдачи данных о ПЭС, поиска соответствующей информации в базе данных и формировании выходного файла с результатами.

#### **Список использованных источников**

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
2. Ясюкевич, Ю.В. Развитие диагностических возможностей приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга состояния ионосферы и коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах Дисс. доктора физико-математических наук. Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – 300 с.
3. Семейство наноспутников изучения ионосферы на базе платформы SamSat разработки Самарского университета / И. В. Белоконов [и др.] // Восьмой Белорусский космический конгресс: материалы конгресса: в 2 т., Минск, 25–27 окт. 2022 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – Т. 1. – С. 167–170.
4. Determination of total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on global navigation satellite systems data / А. О. Naumov [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. – 2024. – Vol. 69, № 1. – P. 53–64.
5. Naumov, A., Khmarskiy, P., Byshnev, N., & Piatrouski, M. (2023). Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations. *Engineering Applications*, 2(3), 243–25310.
6. 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>.
7. 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>
8. Руководство по использованию глобальных навигационных спутниковых систем при выполнении работ по технической инвентаризации и проверке характеристик недвижимого имущества, версия 1.0 / Научно-производственное государственное республиканское предприятие «Национальное кадастровое агентство». – Минск, 2018. – 41 с.