

УДК 629.78

Концепция построения низкоорбитальной группировки-дополнения к системе ГЛОНАСС для повышения устойчивости приема, точности и доступности

Кошелев Иван Владимирович^(*)

ivankoshelev2002@yandex.ru

SPIN-код: 4228-8684

Корянов Всеволод Владимирович

vkoryanov@bmstu.ru

SPIN-код: 6616-8654

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача повышения ключевых характеристик глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС — устойчивости приема, точности и доступности навигационных сигналов. Проведен анализ существующих стратегий развития ГНСС, включающих увеличение числа среднеорбитальных космических аппаратов (КА), использование региональных высокоэллиптических дополнений и формирование низкоорбитальных многоспутниковых группировок. Отмечены преимущества и ограничения каждого из направлений. На основе проведенного анализа сформулирована постановка задачи комплексного исследования, направленного на разработку концептуального облика и технических требований к низкоорбитальной группировке-дополнению, интегрируемой в систему ГЛОНАСС. Определены ключевые направления будущего исследования: анализ вариантов орбитального построения (высота, количество КА, орбитальные параметры), оценка влияния на геометрический фактор и доступность, учет возмущающих факторов, а также разработка требований к системам завершения жизненного цикла КА.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, низкоорбитальная группировка, дополнение ГНСС, точность, доступность, PDOP, орбитальная структура

Concept of a low Earth orbit augmentation constellation for the GLONASS System to enhance reception stability, accuracy and accessibility

Koshelev Ivan Vladimirovich^(*)

ivankoshelev2002@yandex.ru

SPIN-code: 4228-8684

Koryanov Vsevolod Vladimirovich

vkoryanov@bmstu.ru

SPIN-code: 6616-8654

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper considers the task of improving the key characteristics of the global navigation satellite system (GNSS) GLONASS — signal reception robustness, positioning accuracy, and signal availability. An analysis of existing GNSS development strategies is carried out, including an increase in the number of medium Earth orbit (MEO) satellites, the use of regional highly elliptical orbit (HEO) augmentations, and the formation of low Earth orbit (LEO) multi-satellite constellations. The advantages and limitations of each

approach are highlighted. Based on the analysis, the task of a comprehensive study aimed at developing the conceptual design and technical requirements for a LEO complement integrated into the GLONASS system is formulated. The paper identifies key areas of future research: analysis of orbital configuration options (altitude, number of satellites, orbital parameters), assessment of the impact on geometric dilution of precision and signal availability, consideration of perturbing factors, as well as the development of requirements for end-of-life disposal systems for satellites.

Keywords: GLONASS, low Earth orbit (LEO) constellation, GNSS augmentation, accuracy, accessibility, PDOP, orbital structure

Введение. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou широко интегрированы во многие сферы экономики и являются критически важной инфраструктурой для национальной безопасности. Однако существующие среднеорбитальные (высота ~19100 км для ГЛОНАСС) группировки имеют присущие им недостатки, ограничивающие их применение. Ослабленный сигнал в условиях городской застройки, лесной местности и глубоких оврагов приводит к потере связи и снижению доступности навигации. Кроме того, потенциально достижимая точность ограничена геометрическим фактором (PDOP, Position Dilution of Precision), который для самостоятельного режима работы системы ГЛОНАСС остается достаточно высоким (рис. 1), что ограничивает точность позиционирования.

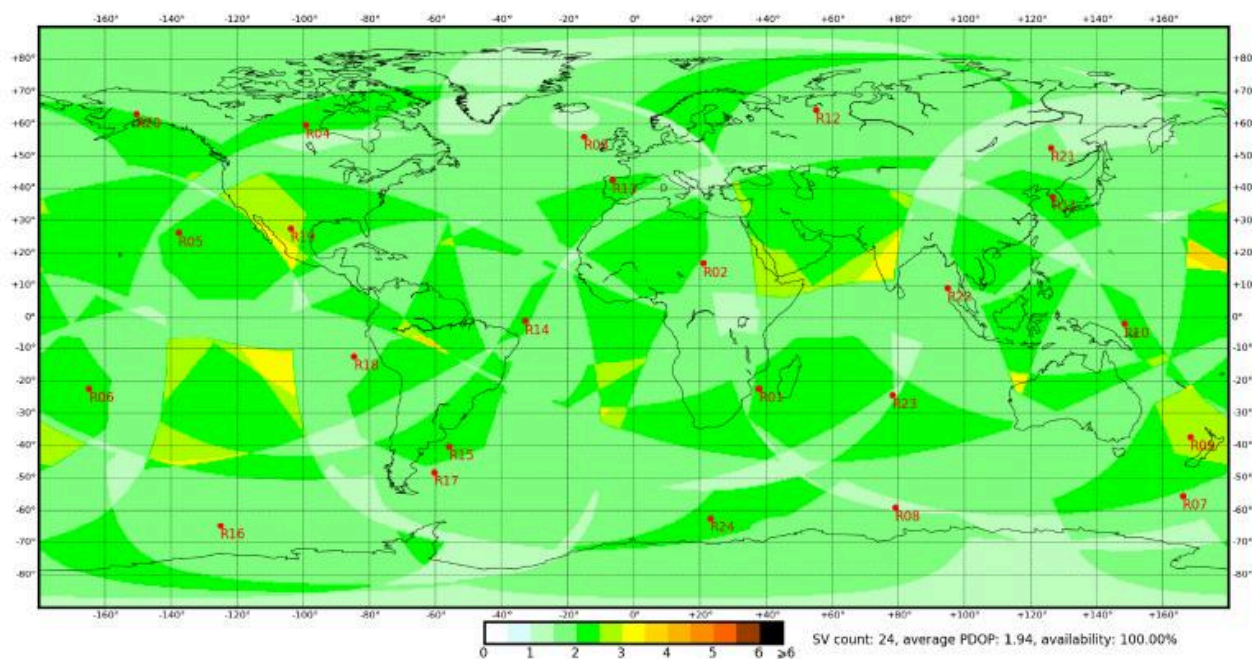


Рис. 1. Геометрический фактор точности определения местоположения потребителя ГЛОНАСС в пространстве (PDOP) [1]

Таким образом, имеем три проблемы:

– неидеальная геометрия созвездия КА, ведущая к высоким значениям PDOP;

- ограниченная точность в самостоятельном режиме работы;
- низкая доступность и устойчивость приема в трудных условиях.

Одним из наиболее перспективных направлений решения этих проблем является использование низкоорбитальной многоспутниковой группировки. Близость к потребителю обеспечивает более мощный принимаемый сигнал, повышенную помехозащищенность и возможность работы в сложных условиях [2]. Группировка из сотен КА позволяет кардинально улучшить геометрию видимых спутников, что ведет к повышению точности и, что важно, доступности навигационного сигнала в любой точке Земной поверхности.

Цель данной работы — сформулировать задачу и наметить план комплексного исследования по разработке концепции облика низкоорбитальной группировки-дополнения к системе ГЛОНАСС, повышающей ее эксплуатационные характеристики.

Сравнительный анализ стратегий повышения характеристик ГНСС. В мировой практике рассматривается несколько концепций преодоления ограничений существующих ГНСС.

Удвоение существующей группировки. Данный подход предполагает увеличение количества навигационных КА (НКА) на тех же орбитах. Моделирование показывает, что развертывание второй группировки из 24 НКА (итого 48 НКА) улучшает равномерность глобального покрытия [3]. Преимущество данного подхода заключается в использовании уже отработанной технологии, однако при этом имеем высокую стоимость выведения, что делает данный вариант экономически неэффективным [3, 4].

Региональное дополнение на высокоэллиптических орбитах (ВЭО). Моделирование работы системы из 24 НКА ГЛОНАСС и 6 НКА на ВЭО демонстрирует высокую эффективность для территории России, увеличивая доступность [5], что является несомненным преимуществом, однако в данном случае главный недостаток — ярко выраженная региональность, высокие технические риски и затраты, связанные с необходимостью повышения мощности передатчиков [4].

Низкоорбитальное дополнение. Это направление предполагает создание многоспутниковых группировок на высотах 500–1200 км. Преимущества данного направления обусловлены следующими причинами: близость к потребителю (мощность сигнала выше, что решает проблему работы в трудных условиях [6]), быстрое изменение геометрии (большое количество спутников кардинально снижает PDOP и ускоряет высокоточное позиционирование [7]). Ярким примером является проект Xona Space Systems (США), развертывающий группировку Pulsar для передачи самостоятельных навигационных сигналов с повышенной точностью [8]. Преимущества данной концепции: глобальное покрытие, мощный сигнал, высокая доступность и точность. Недостатки: высокие затраты на развертывание и поддержание состояния созвездия навигационной группировки.

Таким образом, анализ позволяет выделить три основных направления развития навигационных систем, каждое из которых обладает определенными преимуществами и ограничениями:

- эволюционный подход обеспечивает надежность, однако не решает проблемы радикально. Сохраняется проблема низкой мощности навигационного сигнала;

- региональный ВЭО подход демонстрируем эффективность для территории Российской Федерации, но не обеспечивает глобального покрытия. Также данный подход требует усложнения аппаратуры;

- низкоорбитальный подход открывает возможность комплексного повышения характеристик навигации и рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений, что подтверждается активными разработками ведущих зарубежных компаний.

Постановка задачи исследования. На основании анализа мировой практики формулируется задача исследования: разработать концептуальный облик и технические требования к российской группировке-дополнению ГЛОНАСС. Для ее решения необходимо провести комплексное моделирование и анализ в ряде следующих направлений.

Выбор высоты орбиты. Планируется проведение моделирования для различных высот и сравнения по следующим критериям: геометрический фактор PDOP (глобальный, средний, максимальный) для различного числа КА и доступность. Также необходимо провести анализ влияния околоземного пространства (атмосферное торможение — особенно для низких орбит ~500 км, неоднородность гравитационного поля Земли, давление солнечного излучения и т. д.) на стабильность орбиты, а также сформулировать требования к бортовой аппаратуре и системам коррекции.

Проведение оценки минимально необходимого количества КА. Необходимо проанализировать зависимость числа КА от глобальной доступности. Также провести анализ отказоустойчивости, например, когда часть группировки не дает полезной информации (в момент коррекции) — не ухудшаются ли характеристики всей системы в целом.

Разработка требований к системам завершения жизненного цикла КА. Для каждого рассматриваемого варианта высоты необходимо сформулировать требования к характеристикам двигательных установок (в части требуемых запасов характеристической скорости) для перевода КА на орбиты захоронения или затопления.

Разработка предложений по орбитам захоронения и затопления КА в конце срока их функционирования с учетом международных требований по ограничению засорения окружающего космического пространства.

Ожидаемые результаты. В рамках будущего исследования планируется получить следующие результаты.

1. Оптимальные параметры орбитальной группировки (высота, наклонение, количество плоскостей, количество КА в плоскости) для заданных требований по точности и доступности.

2. Зависимости доступности, среднего глобального PDOP от количества функционирующих КА.

3. Рассчитанные значения характеристических скоростей для маневров увода для каждого варианта.

4. Предложения по облику орбитальной группировки и технические требования к ней.

5. Формулирование методики обоснования параметров низкоорбитальной группировки-дополнения.

План работы включает следующие этапы: разработка моделей системы, создание программно-математического обеспечения для проведения серии необходимых расчетов, анализ результатов и формулирование выводов и рекомендаций.

Заключение. Развертывание национальной низкоорбитальной группировки-дополнения представляется стратегически важным шагом для обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в области спутниковой навигации. Представленная постановка задачи определяет план для комплексного исследования, нацеленного на поиск оптимальных параметров такой группировки.

Список источников

- [1] *Оценка технических характеристик ГЛОНАСС*. URL: <https://glonass-iac.ru/glonass/technical/> (дата обращения 15.08.2025).
- [2] Reid T.G.R. Satellite Navigation for the Age of Autonomy. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Portland, 2020, pp. 342–352. <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109938>
- [3] Ватутин С.И., Бирюков А.А., Курков И.К. Сравнительный анализ глобальных дополнений системы ГЛОНАСС. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4. № 4, с. 3–14. <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.3>
- [4] Мещеряков В.М., Брагинцев В.Ф., Сухой Ю.Г. Анализ особенностей технической реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса системы ГЛОНАСС. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, № 2, с. 85–95. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1848>
- [5] Топорков А.Г. Повышение точности и доступности ГЛОНАСС для гражданских потребителей за счет высокоорбитального космического комплекса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, № 7. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2294>.
- [6] Çelikbilek K., Lohan E.S. A Performance Study on the Combination of Available GNSS and Potential LEO-PNT Constellations. *IEEE Access*, 2024, vol. 12. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3490892>
- [7] Li X., Lv H., Ma F. GNSS RTK Positioning Augmented with Large LEO Constellation. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 3, art. no. 28. <https://doi.org/10.3390/rs11030228>
- [8] *Xona Space Systems Official Website*. URL: <https://www.xonaspace.com/> (accessed 15.08.2025).