

Исследование низкоорбитального дополнения на высоте 2000 км для системы глонасс с возможностью полного покрытия земли при различных вариантах ширины диаграммы направленности антенн космического аппарата

К. Р. Плыкин^{1,2}, М. М. Валиханов², А. Н. Верещагин², А. С. Пустошилов²,
Ю. Б. Волошко³, О. В. Ружилова³

¹АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

³АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»

Аннотация: У современных глобальных навигационных спутниковых систем на средне-высотных и геостационарных орбитах имеются два существенных недостатка. Первый – это деградация уровня доступности (по критерию геометрического фактора по местоположению (PDOP) ≤ 6) и среднего значения геометрического фактора при увеличении угла места приема навигационных сигналов, обусловленного естественным или антропогенным рельефом местности, что приводит как к снижению уровня точности навигационных определений, так и к полному отказу навигации. Второй – низкий уровень навигационного сигнала в зоне использования (земная поверхность и атмосфера Земли), что при значительном уровне радиопомех приводит к невозможности навигационных определений.

Ключевые слова: низкоорбитальное дополнение, группировка из низколетящих космических аппаратов, ГЛОНАСС.

Для цитирования: Плыкин К. Р., Валиханов М. М., Верещагин А. Н., Пустошилов А. С., Волошко Ю. Б., Ружилова О. В. Исследование низкоорбитального дополнения на высоте 2000 км для системы ГЛОНАСС с возможностью полного покрытия Земли при различных вариантах ширины диаграммы направленности антенн космического аппарата // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 3. С. 38–51. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-1-38-58>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Плыкин К. Р., Валиханов М. М.,
Верещагин А. Н., Пустошилов А. С.,
Волошко Ю. Б., Ружилова О. В., 2025
Статья поступила в редакцию 20.01.2025;
переработанный вариант – 20.03.2025;
принята к публикации 29.04.2025.

1. Введение

Недостаток, связанный с деградацией уровня доступности Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), может быть парирован использованием навигационных сигналов всех доступных мировых ГНСС, что и делается в большинстве современных навигационных приемников. Например, в современных навигационных чипах, установленных в смартфоны пользователей, используется мультисистемный прием, и совместно решается навигационная задача – определение координат местоположения.

Вместе с тем, исходя из стратегических интересов Российской Федерации (РФ), должна обеспечиваться самодостаточность системы ГЛОНАСС во всех условиях её применения. Для достижения указанных целей возможны следующие пути:

1. Количественное увеличение навигационных космических аппаратов (НКА) действующей среднеорбитальной группировке ГЛОНАСС для повышения глобальных характеристик самой системы. В определенной степени этот вопрос затронут в материалах доклада на Европейской конференции [1], а также в статьях [2–7].

2. Построение регионального дополнения к системе ГЛОНАСС, наподобие геосинхронных НКА у системы Beidou, для повышения характеристик системы ГЛОНАСС на территории РФ. АО «РЕШЕТНЁВ» данный вариант прорабатывает в настоящее время.

3. Создание низкоорбитального дополнения ГЛОНАСС для использования его навигационных сигналов совместно с сигналами среднеорбитальной системы ГЛОНАСС. Можно полагать, что навигационные сигналы низкоорбитального дополнения будут аналогичны сигналам ГЛОНАСС с кодовым разделением и их совместное использование будет возможно при модификации программного обеспечения навигационных приёмников на базе существующей аппаратной части.

ГНСС сегодня имеют важное значение как для бизнеса, так и для государственного стратегического назначения, и ГЛОНАСС не является исключением. Базовая орбитальная группировка (ОГ), НКА которой расположены на средневысотных орбитах (19100 км.) [8], и будущее высокоорбитальное дополнение (36000 км.) [9] имеют один существенный недостаток, особенно в условиях радиопомеховой обстановки – это обнаружение и прием навигационного сигнала. Данная проблема описывает второй рассматриваемый недостаток, который можно парировать многократным повышением излучаемой мощности навигационных сигналов, что нереализуемо для существующих и перспективных НКА на средневысоких орбитах. Выходом из данной ситуации является уменьшение высоты орбиты НКА, что позволяет в квадрате от соотношения высот уменьшить потери на распространение сигналов и, соответственно, при доступной мощности передатчика сигналов обеспечить высокий уровень сигнала в зоне обслуживания. Платой за уменьшение высоты орбиты является необходимость существенного увеличения количества НКА в низкоорбитальном дополнении. Среди всех действующих на сегодняшний момент ГНСС система ГЛОНАСС характеризуется максимальным значением параметра наклона орбиты к плоскости экватора, равного 63 градусам. Это означает, что КА могут достигать соответствующего максимального значения широты. Для других ГНСС этот параметр составляет не более 55 градусов. Известно, что у всех действующих среднеорбитальных ГНСС КА не пересекают полюса Земли, соответственно, для наблюдателя в этом регионе они располагаются ближе к горизонту. В связи с этим геометрический фактор резко уменьшается из-за отсутствия спутников, близких к зениту. Низкоорбитальная система с углом наклона около 90 градусов, при условии совместного измерения с сигналами действующей системы ГЛОНАСС, позволяет устранить данный недостаток.

АО «РЕШЕТНЁВ» уже рассматривает данное направление для решения проблемы навигации в зданиях и в условиях сложной помеховой обстановки [10], а ниша низковысотных НКА сегодня стремительно развивается как в сферах связи и интернет вещей, так и спутниковой радионавигации. В настоящее время известны такие иностранные компании, как Iridium[11], One Web[11], SpaceX[11], Samsung[11], Boeing [11] и др., которые предлагают собственные решения низкоорбитальных связных систем. Несмотря на то, что данные системы являются связными, определение координат на стороне пользователя возможно при использовании измерений доплеровского смещения несущей частоты сигнала. Для передачи информации о положении спутников (эфемериды) используется канал связи коротких сообщений (пейджинговый). В ближайшее время некоторые страны планируют запустить навигационные системы на низкой орбите. Примером может служить система Pulsar фирмы Хона Space Systems (США) [12]. Определение местоположения самого спутника предлагается выполняется по сигналам ГНСС (заявляется о системах GPS и Galileo), а также осуществляется прием сигналов от телевизионных станций и сотовых вышек. В основу положен SDR прин-

цип приема и генерации сигналов [12], спутник излучает собственные сигналы в S-диапазоне. В 2022 году был запущен единственный демонстрационный спутник.

Таблица 1. Краткие характеристики связных и навигационных систем на низкой орбите

Система	Iridium	Startlink	OneWeb	Pulsar
Высота орбиты, км	781	550-560	1200	800
Количество спутников	75	Более 6500	634	260

Низкоорбитальные НКА размещаются на высотах от 500 до 2000 километров над поверхностью Земли. Благодаря своей близости к Земле эти НКА могут обеспечивать очень малое время отклика (задержку), что имеет решающее значение для приложений в реальном времени, и достаточно высокий уровень сигнала для обнаружения аппаратурой потребителей даже в условиях помеховой обстановки. Низкая орбита, при сравнении со средними, существенно уменьшает зону обслуживания одного НКА, а учитывая, что низколетящие НКА имеют высокую скорость движения вокруг Земли, для полного покрытия требуется созвездия с большим количеством НКА и дополнительные затраты на обслуживание и поддержание целостности ОГ.

Стоит отметить, что при использовании узкой диаграммы направленности антенны (ДНА) количество КА возрастает довольно существенно. В работе рассматриваются «простые» (наклон плоскостей и количество КА на них равны для всех плоскостей) ОГ. При большом количестве КА необходимо рассматривать уже «комбинированные» ОГ.

При использовании «комбинированных» ОГ с большим количеством КА необходимо учитывать не только число плоскостей и спутников, но и параметры их относительного расположения, такие как углы между плоскостями и фазовые углы между спутниками. Для больших ОГ эти параметры становятся критичными для оптимизации и эффективности. Описание структуры ОГ должно включать эти дополнительные параметры наряду с параметрами орбиты. Оптимальная структура больших ОГ на наклонных орбитах достигается по принципу «один спутник – одна плоскость» с подбором фазового соотношения, что обеспечивает равномерное распределение спутников, снижает их количество и упрощает частотное планирование. Развертывание таких ОГ эффективно проводить с помощью тяжелых ракет-носителей, выводящих много спутников на низкую орбиту, с последующим их самостоятельным маневрированием на целевые позиции, как это делает Starlink. Для новых многоспутниковых систем на низких околоземных орбитах критически важна оптимизация структуры орбитальной группировки для минимизации количества спутников и, следовательно, затрат на создание и развертывание системы при сохранении её функциональности [13].

Формирование «комбинированных» ОГ для низкоорбитальных КА с маленькой ДНА в данной работе не рассматриваются.

При этом следует полагать, что существенное повышение мощности сигналов диапазона L низкоорбитального дополнения будет создавать помехи действующим сигналам среднеорбитального ГЛОНАСС. Для низколетящих КА обеспечение целостности навигационного поля критически важно, особенно в условиях потенциальных помех. В этом контексте алгоритмы Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) и Advanced RAIM (AAIM) приобретают особую значимость. RAIM использует избыточность измерений от спутников для обнаружения и исключения ошибочных данных, позволяя оценить достоверность получаемой информации о местоположении. AAIM, будучи усовершенствованным вариантом RAIM, использует дополнительные источники данных, такие как информация от наземных станций и данные о состоянии ионосферы, для повышения точности и надежности оценки целостности. В условиях потенциальных помех от низкоорбитального дополнения эффективность алгоритмов RAIM и AAIM в обеспечении надежной навигации низколетящих КА становится ключевым фактором. Таким образом, для обеспечения одновременного использования сигналов среднеорбитального ГЛОНАСС и низкоорбитального дополнения (с высоким уровнем

сигналов) необходимо использование иного частотного диапазона навигации, чем у текущего ГЛОНАСС. Кроме того, интеграция RAIM/AAIM в систему низкоорбитального дополнения позволит гарантировать необходимый уровень безопасности и надежности навигации для низколетящих КА. Данная интеграция уже рассматривалась ранее на различных вариантах низкоорбитального дополнения [14].

Глобальное покрытие и непрерывная доступность услуг, предоставляемых КА, являются критически важными факторами для целого ряда применений, включая навигацию, связь, наблюдение Земли и мониторинг окружающей среды. Обеспечение постоянной видимости КА, по крайней мере, одного или нескольких, в любой точке земного шара позволяет реализовать надежные и эффективные системы, способные оперативно реагировать на возникающие ситуации и предоставлять необходимую информацию в режиме реального времени. Отсутствие же такой видимости может привести к критическим сбоям в работе систем и потере данных. Таким образом, целью работы является определение видимости (количества) космических аппаратов в каждой точке сформированной и наложенной на земной поверхности сетки, а также расчет значения PDOP.

2. Описание моделирования и основные результаты

Во время исследования были рассмотрены НКА с различными ширинами ДНА: 60° , 80° , 100° . Так как НКА с различными ширинами ДНА будут покрывать разную площадь поверхности Земли, соответственно сформировано три ОГ, которые отличны между собой количеством плоскостей и НКА в каждой плоскости (см. таблицу 2): НОД-ОГ-60, НОД-ОГ-80, НОД-ОГ-100. Орбитальная группировка формируется таким образом, чтобы покрыть Землю с возможностью видимости хотя бы одного НКА в любой точке земного шара при минимальной угле места (УМ) не менее 10° .

Таблица 2. Количество НКА в ОГ низкоорбитального дополнения для системы ГЛОНАСС

Наименование	НОД-ОГ-60	НОД-ОГ-80	НОД-ОГ-100
Ширина ДНА	60°	80°	100°
Кол-во плоскостей	11	8	4
Кол-во НКА в плоскости	18	11	7
Общее кол-во НКА в ОГ	198	88	28

При формировании ОГ низковысотного дополнения для системы ГЛОНАСС использовался математический пакет «Platform in satellite scenario» программы Matlab [15], где применяется модель движения SGP4 [16]. Основные параметры, выбранные на основе образа низкоорбитального дополнения [17]:

- 1) высота орбит 2000 км;
- 2) наклонение плоскости орбиты 88° ;
- 3) эксцентриситет орбит 0,0007.

Построенные ОГ с выбранным наклонением позволяют обеспечить лучшее покрытие в северных широтах, а выбранная высота – уменьшить требуемое количество НКА для полного покрытия земного шара. На рисунке 1 представлена ОГ низкоорбитального дополнения НОД-ОГ-100 с визуализацией площади покрытия каждого НКА.

В работе для моделирования низкоорбитального дополнения совместно с базовой орбитальной группировкой использовалось две модели движения: SGP4 [18] и алгоритм расчета координат и составляющих вектора скорости центра масс НКА по данным альманаха [19], соответственно. Временной промежуток моделирования составляет 8 суток с шагом 15 минут. Моделирование заключается в имитировании приема навигационного сигнала навигационной аппаратурой потребителя (НАП) в узлах сформированной сетки на двух типах местности: загородной ($УМ > 10^\circ$) и городской ($УМ > 30^\circ$). Следует отметить, для проводи-

мых исследований используется неравномерная сетка, т. е. в зависимости от широты количество узлов по долготе будет различным. Наибольшее количество узловых точек будет на экваторе, и с увеличением модуля широты их число уменьшается в соответствии с корректирующим коэффициентом $\cos(B)$, а для $|B| = 90^\circ$ будет только одна точка. Значение широты изменяется -90° до 90° с шагом 1.

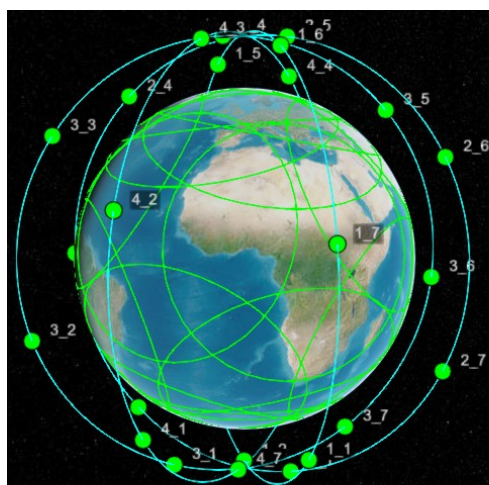


Рис. 1. Низкоорбитальное дополнение для системы ГЛОНАСС НОД-ОГ-100.

Примечание: покрытие Земли одним НКА выделено зеленым цветом. НКА также выделен зеленым цветом и имеет маркировку X_Y , где X – условный номер орбиты в ОГ, Y – условный номер НКА на орбите

Основными критериями оценки эффективности ОГ низкоорбитальных дополнений служат:

1. Видимость НКА в узлах сформированной сетки.
2. Геометрический фактор точности определения местоположения потребителя ГНСС в пространстве (PDOP). Это коэффициент точности определения пространственных координат потребителя ГНСС [20].
3. Геометрический фактор точности определения местоположения потребителя ГНСС по горизонтали (HDOP). Это коэффициент пропорциональности между среднеквадратической погрешностью определения горизонтальных координат потребителя ГНСС и среднеквадратической погрешностью определения псевдодальности до навигационного космического аппарата ГНСС [20].
4. Геометрический фактор точности определения местоположения потребителя ГНСС по вертикали (VDOP). Это коэффициент пропорциональности между среднеквадратической погрешностью определения высотной составляющей местоположения потребителя ГНСС и среднеквадратической погрешностью определения псевдодальности до навигационного космического аппарата ГНСС [20].
5. Рабочие зоны по критерию минимума (минимальное количество видимых НКА в узлах сформированной сетки не менее 4 и PDOP не хуже 6) и максимума (минимальное количество видимых НКА в узлах сформированной сетки не менее 9 и PDOP не хуже 2).

Как было сказано ранее, в данном исследовании используется неравномерная сетка. Для анализа изменения вышеприведенных критериев, в каждой узловой точке сформированной сетки добавляется третья координата – время. Добавление третьей координаты усложняет анализ результатов, поэтому предлагается выполнить сжатие информации по следующему принципу – для каждой узловой точки вычислять минимум, среднее значение и максимум на интервале моделирования, соответственно, в результате обработки будут получены три типа сеток. Предложенный принцип позволяет графически представить результаты исследований и численно сравнивать их.

В таблицах 3– представлены результаты моделирований базовой ОГ системы ГЛОНАСС, а также низкоорбитальные дополнения НОД-ОГ-100, НОД-ОГ-80 и НОД-ОГ-60

совместно с базовой ОГ системы ГЛОНАСС, соответственно. К каждому параметру оценки эффективности ОГ приведены значения:

- 1) МИН – математическое ожидание по узлам сформированной сетки, в каждом узле определяется минимальное значение на интервале моделирования;
- 2) МО – математическое ожидание по узлам сформированной сетки, в каждом узле вычисляется среднее значение на интервале моделирования;
- 3) МАКС – математическое ожидание по узлам сформированной сетки, в каждом узле определяется максимальное значение на интервале моделирования.

Также результаты представлены для двух регионов:

- 1) МИР – моделирование производилось по всему земному шару в рамках сформированной сетки;
- 2) РФ – моделирование производилось только на территории Российской Федерации. Стоит упомянуть о том, что при моделировании максимально возможное значение у PDOP, HDOP и VDOP составляет 10, что свидетельствует о плохом геометрическом факторе.

Таблица 3. Результаты моделирования базовой ОГ системы ГЛОНАСС

Параметр		Загородная местность		Городская местность	
		МИР	РФ	МИР	РФ
Видимость НКА	МИН	4	5	2	3
	МО	7	8	4	4
	МАКС	10	10	6	7
PDOP	МИН	1,49	1,39	2,94	2,69
	МО	2,61	2,25	8,45	7,32
	МАКС	9,02	7,2	10	10
HDOP	МИН	1,21	0,94	2,37	1,63
	МО	2,14	1,46	7,7	5,61
	МАКС	8,16	4,67	10	10
VDOP	МИН	0,76	0,95	0,8	1,84
	МО	1,42	1,7	7,21	6,49
	МАКС	8,53	6,97	10	10
Рабочая зона по критерию минимума ($\text{НКА} \geq 4$, $\text{PDOP} \leq 6$)		0,98	0,99	0,23	0,42
Рабочая зона по критерию максимума ($\text{НКА} \geq 9$, $\text{PDOP} \leq 2$)		0,08	0,19	0	0

Моделирование базовой ОГ системы ГЛОНАСС осуществлялось по альманаху, полученного с FTP-сервера архива Прикладного потребительского центра ГЛОНАСС [21] за 5 октября 2023 года, на указанный момент времени система функционировала в полном объеме, т. е. все 24 НКА исправны. Для загородной местности полученные данные свидетельствуют о средней, по земному шару, минимальной видимости НКА в количестве 4, средней 7, для РФ количество видимых НКА разнятся немного. Для городской местности количество видимых НКА падает в два раза. Значения PDOP, HDOP и VDOP загородной местности в основном отличаются в 3 раза от значений при городской застройке. Полученное значение рабочей зоны по минимальному критерию соответствует [22], данный критерий устарел, так как при городской застройке стандартная система перестает работать и значение рабочей зоны составляет всего 0,23 (0,42 для РФ). Для условно «идеальной» навигации присутствует параметр: рабочая зона по критерию максимума, значение которой составляет 0,08 (0,19 для РФ) при $\text{УМ} > 10^\circ$, а при $\text{УМ} > 30^\circ$ рабочая зона вовсе отсутствует.

Таблица 4. Результаты моделирования НОД-ОГ-100 совместно с базовой ОГ системы ГЛОНАСС

Параметр		Загородная местность		Городская местность	
		МИР	РФ	МИР	РФ
Видимость НКА	МИН	6	7	2	3
	МО	9	11	5	6
	МАКС	13	15	7	9
PDOP	МИН	1,33	1,21	2,67	2,4
	МО	2,09	1,76	7,51	5,99
	МАКС	8,16	5,23	10	10
HDOP	МИН	1,07	0,79	2,14	1,45
	МО	1,71	1,12	6,67	4,19
	МАКС	7,44	3,56	9,87	9,68
VDOP	МИН	0,67	0,85	0,84	1,7
	МО	1,12	1,34	5,79	4,98
	МАКС	5,5	4,84	10	10
Рабочая зона по критерию минимума ($\text{НКА} \geq 4$, $\text{PDOP} \leq 6$)		0,99	1	0,37	0,61
Рабочая зона по критерию максимума ($\text{НКА} \geq 9$, $\text{PDOP} \leq 2$)		0,41	0,78	0	0

Добавление низкоорбитального дополнения НОД-ОГ-100 увеличивает количество видимых НКА в загородной местности в среднем на три НКА, но в пике данное значение увеличивается до пяти НКА, стоит учитывать, что это НКА, которые имеют уровень сигнала в сто раз мощнее по сравнению с базовой ОГ. Но в городской местности значение видимости НКА увеличивается до двух НКА. Значения PDOP, HDOP и VDOP для $\text{УМ} > 10^\circ$ улучшилось незначительно, а для $\text{УМ} > 30^\circ$ – примерно на единицу. Рабочая зона по критерию минимума в городской местности увеличилась на 20%. По критерию максимума в загородной местности использование низкоорбитального дополнения НОД-ОГ-100 дает достаточно существенное преимущество для всего земного шара – это 30%, а для РФ 50%. В городской местности по критерию максимума полученная система неработоспособна.

Таблица 5. Результаты моделирования НОД-ОГ-80 совместно с базовой ОГ системы ГЛОНАСС

Параметр		Загородная местность		Городская местность	
		МИР	РФ	МИР	РФ
Видимость НКА	МИН	6	7	3	5
	МО	9	11	6	8
	МАКС	12	15	9	11
PDOP	МИН	1,35	1,26	2,48	5
	МО	2,23	1,92	6,16	8
	МАКС	8,39	5,64	9,78	11
HDOP	МИН	1,08	0,83	2	2,22
	МО	1,82	1,24	5,3	4,49
	МАКС	7,79	4,14	9,39	9,51
VDOP	МИН	0,7	0,87	1,08	1,34
	МО	1,2	1,44	3,96	2,86
	МАКС	6,11	5,2	9,76	8,41
Рабочая зона по критерию минимума ($\text{НКА} \geq 4$, $\text{PDOP} \leq 6$)		0,99	1	0,57	0,83
Рабочая зона по критерию максимума ($\text{НКА} \geq 9$, $\text{PDOP} \leq 2$)		0,37	0,68	0	0

Низкоорбитальное дополнение НОД-ОГ-80 увеличивает видимость НКА от двух до пяти для РФ и от двух до четырех для всего земного шара, независимо от используемой местности. При $УМ > 10^\circ$ значения PDOP, HDOP и VDOP изменились на считанные доли, но при $УМ > 30^\circ$ НОД-ОГ-80 дало значительное преимущество перед базовой ОГ в среднем на 2, перед НОД-ОГ-100 на 1,5. Полученные значения рабочей зоны в загородной местности улучшились на 35% для всего мира и 40% для РФ, что на 20% лучше, чем у НОД-ОГ-100. Оценка рабочей зоны по критерию максимума улучшилась на 30% для всего земного шара и на 50% для РФ для загородной местности, в сравнении с НОД-ОГ-100 значение для РФ ухудшилось на 10%. Стоимость развертывания и поддержания системы НОД-ОГ-80 минимум в два раза выше по сравнению с НОД-ОГ-100, а то и выше, так как количество НКА в дополнениях отличны в три раза.

Таблица 6. Результаты моделирования НОД-ОГ-60 совместно с базовой ОГ системы ГЛОНАСС

Параметр		Загородная местность		Городская местность	
		Мир	РФ	Мир	РФ
Видимость НКА	МИН	6	7	3	4
	МО	9	10	6	7
	МАКС	12	14	9	11
PDOP	МИН	1,33	1,24	2,53	2,3
	МО	2,16	1,88	6,56	5,23
	МАКС	8,25	5,53	9,87	9,74
HDOP	МИН	1,07	0,85	2,05	1,41
	МО	1,76	1,25	5,65	3,49
	МАКС	7,67	4,18	9,48	8,68
VDOP	МИН	0,69	0,84	1,1	1,64
	МО	1,18	1,39	4,41	4,17
	МАКС	5,95	5,22	9,85	9,7
Рабочая зона по критерию минимума ($НКА \geq 4$, $PDOP \leq 6$)		0,99	0,99	0,5	0,7
Рабочая зона по критерию максимума ($НКА \geq 9$, $PDOP \leq 2$)		0,39	0,69	0	0

Добавление низкоорбитального дополнения НОД-ОГ-60 к базовой системе ГЛОНАСС минимально увеличило количество видимых НКА на два, что в среднем на один НКА меньше, чем у других рассмотренных вариантов. Значения PDOP, HDOP и VDOP при $УМ > 10^\circ$ в пике в среднем уменьшилось на один, при рассмотрении в среднем для $УМ > 30^\circ$ показатель улучшился на два. В сравнении с другими вариантами полученные данные являются средними между НОД-ОГ-100 и НОД-ОГ-80. Рабочая зона для городской местности по сравнению с базовой ОГ увеличилась на 30%. Если рассмотреть рабочую зону по критерию максимума, то она увечилась на 30% по миру и на 50% по РФ. На основе полученных значений низкоорбитальное дополнение НОД-ОГ-60 можно охарактеризовать как нечто среднее между НОД-ОГ-100 и НОД-ОГ-80, но стоит учитывать, что данная группировка имеет самое большое количество НКА, что удорожает стоимость поддержки и развёртывания такой системы.

3. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее эффективное низкоорбитальное дополнение является ОГ НОД-ОГ-100, с точки зрения возможных затрат и полученных характеристик. Отношение видимых НКА к количеству НКА в ОГ минимум в два раза выше, чем у других рассмотренных вариантах, рабочая зона в загородной местности выше, но в

районах городской застройки немного уступает, значение PDOP также рознится несильно. При рассмотрении результатов следует учитывать количество НКА в ОГ низкоорбитального дополнения, так как это влияет на финансовые затраты при выводе и поддержании данной ОГ. Данная работа не затрагивала вопросы устойчивости и способы поддержания построенных орбит.

Дальнейшие исследования будут направлены на сравнительные оценки различных вариантов построения системы ГЛОНАСС совместно с низкоорбитальным дополнением: наращенный состав среднеорбитальной группировки ГЛОНАСС, будущее высокоорбитальное дополнение системы ГЛОНАСС, а также комбинация перечисленных вариантов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Литература

1. Леонидов Н., Волошко Ю., Выгонский Ю. Перспективные направления развития орбитальной группировки ГЛОНАСС с использованием CDMA - нового типа сигнала: материалы Европейской Навигационной Конференции (ENC 2020) / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) German Institute of Navigation. – Германия, Дрезден, 2020. – 11 с.
2. Шилко И. И., Волошко Ю. Б., Ружилова О. В., Анисимова О. А. Анализ вариантов модернизации структуры орбитальной группировки системы ГЛОНАСС для обеспечения её конкурентоспособности // Космические аппараты и технологии. 2019. Том 3. № 1 (27). С. 5–12.
3. Мещеряков В. М., Брагинец В. Ф., Сухой Ю. Г. Архитектура орбитальной группировки ГЛОНАСС, обеспечивающая глобальное выполнение перспективных требований по среднему значению пространственного геометрического фактора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 10. 13 с.
4. Ступак Г. Г., Ревнивых С. Г., Игнатович Е. И., Куришин В. В., Бетанов В. В., Панов С. С., Бондарев Н. З., Чеботарев В. Е., Балашова Н. Н., Сердюков А. И., Синцова Л. Н. Выбор структуры орбитальной группировки перспективной системы ГЛОНАСС // Исследования наукограда. Космонавтика. 2013. № 3-4 (6). С. 3–11.
5. Ступак Г. Г., Ревнивых С. Г., Игнатович Е. И., Куришин В. В., Бетанов В. В., Панов С. С., Бондарев Н. З., Чеботарев В. Е., Балашова Н. Н., Сердюков А. И., Синцова Л. Н. Исследование вариантов совершенствования структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС до 2020 года и далее с учетом доведения ее состава к 2020 году до 30 КА // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 23–31.
6. Ступак Г. Г., Куришин В. В., Бетанов В. В. Орбитальное перестроение системы ГЛОНАСС // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. Исследования и разработки. 2013. Выпуск 76. С. 44–51.
7. Плыкин К. Р., Чурсина О. А., Валиханов М. М., Волошко Ю. Б. Исследование рабочей зоны системы ГЛОНАСС при различных вариантах построения ОГ // Решетнёвские Чтения. Материалы XXIV Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2020. С. 227–229.
8. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС), Королёв 2019. Редакция 2.2 (6.2019) URL: <https://glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos.pdf>.
9. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Газета «Сибирский спутник». ГЛОНАСС. 2022. № 16 (554). С. 3 URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/newspaper/newspaper-2022/newspaper-554.pdf>.

10. Межотраслевой журнал навигационных технологий «Вестник ГЛОНАСС». Новость «Развитие низкоорбитального дополнения системы ГЛОНАСС обеспечит навигацию в зданиях» от 10 июля 2024 URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/razvitie-nizkoorbitalnogo-dopolneniya-sistemy-glonass-obespechit-navigatsiyu-v-zdaniyakh/>.
11. Tyler G. R. Reid, Todd Walter, Per K. Engel, David Lawrence, H. Stewart Cobb, Greg Gutt, Michael O'Conner, David Whelan. Navigation from Low Earth Orbit // Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, Volume 2. 2021. P. 1359–1412.
12. Miller Noah S., Koza J. Tanner, Morgan Samuel C., Martin Scott M., Neish Andrew, Grayson Robert, Reid Tyler. SNAP: A Xona Space Systems and GPS Software-Defined Receiver, // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey. 2023. PP. 897–904.
13. Анпилогов. В., Гриценко. А. Оптимальные низкоорбитальные группировки // Спутниковая связь и вещание. 2022. С. 44–47.
14. Леонидов. Н. В. Автономные алгоритмы контроля целостности навигационного поля применительно к ГНСС ГЛОНАСС // Космические аппараты и технологии. 2021. С. 44–50. DOI 10.26732/j.st.2021.1.05.
15. Математический пакет «Platform in satellite scenario» программы Matlab URL: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/ug/satellite-scenario-overview.html>.
16. Математический пакет «satelliteScenario» программы Matlab URL: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/ug/satellitescenario.html>.
17. Леонидов Н. В., Митина М. В. Образ низкоорбитального дополнения к орбитальной группировке системы ГЛОНАСС // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 66–70.
18. Vallado D., Crawford P. SGP4 orbit determination // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. 2008. 6770 p.
19. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов – Введ. 2016. – Москва : Российские космические системы. 2016. 133 с.
20. ГОСТ Р 52928-2010. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения : нац. Стандарт российской федерации : утвержден и введен в действие приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 ноября 2010 г. № 353-ст: взамен гост р 52928-2008: дата введения 2014-07-01. (система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу) // кодекс: электрон. Фонд правовой и норматив. – техн. Информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110468>.
21. FTP-архив Прикладного потребительского центра URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru>.
22. ГОСТ 32454-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний: нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 апреля 2014 г. № 355-ст: введен впервые: дата введения 2014-07-01. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу) // Кодекс: электрон. фонд правовой и норматив. – техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110468>.

Плыкин Константин Русланович

аспирант кафедры Радиотехника института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (ИИФиРЭ СФУ, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 28), инженер-конструктор 3 категории АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» (АО «НПП «Радиосвязь», 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, д. 19), тел. 8-913-574-17-80, e-mail: kplykin@sfu-kras.ru. ORCID ID 0009-0005-4695-3979.

Валиханов Марат Музагитович

к.т.н., доцент кафедры Радиотехника института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (ИИФиРЭ СФУ, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 28), тел. 8-913-517-37-65, e-mail: mvalikhanov@sfu-kas.ru. ORCID ID 000-0002-7895-9639.

Верещагин Антон Николаевич

старший преподаватель кафедры Радиотехника института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (ИИФиРЭ СФУ, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 28), тел. 8-923-306-84-43, e-mail: avereshagin@sfu-kras.ru. ORCID ID 0000-0003-1299-7453.

Пустошилов Александр Сергеевич

к.т.н., доцент кафедры Радиотехника института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (ИИФиРЭ СФУ, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 28), тел. 8-913-596-99-58, e-mail: apustoshilov@sfu-kras.ru. ORCID ID 0000-0002-5352-5164.

Волошко Юрий Борисович

ведущий инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «РЕШЕТНЁВ», 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 52), тел. 8-983-154-58-70, e-mail: ubv@iss-reshetnev.ru. ORCID ID 0009-0001-3263-3924.

Ружилова Ольга Владимировна

ведущий инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «РЕШЕТНЁВ», 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 52), тел. 8-913-550-01-52, e-mail: ruj@iss-reshetnev.ru. ORCID ID 0009-0003-7314-7679.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Study of low-orbital augmentation at 2000 km for the GLONASS system with full Earth coverage capability with various antenna bandwidth variants of the spacecrafts

Konstantin R. Plykin^{1,2}, Marat M. Valikhanov², Anton N. Vereshchagin², Alexander S. Pustoshilov², Yuriy B. Voloshko³, Olga V. Ruzhilova³

¹JSC «Scientific production enterprise «Radiosviaz»

²Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University

³JSC Information Satellite Systems Reshetnev

Abstract: Modern global navigation satellite systems in medium-altitude and geostationary orbits have two significant drawbacks. The first is the degradation of the availability level (according to the criterion of the geometric factor by location ($\text{PDOP} \leq 6$) and the average value of the geometric factor with an increase in the angle of reception of navigation signals due to natural or anthropogenic terrain, which leads to both a decrease in the accuracy of navigation definitions and a complete failure of navigation. The second is the low level of the navigation signal in the zone of use (the Earth's surface and atmosphere), which, with a significant level of radio interference, leads to the impossibility of navigation definitions.

Keywords: low-orbit augmentation, grouping of low-flying spacecraft, GLONASS.

For citation: Plykin K. R., Valikhanov M. M., Vereshchagin A. N., Pustoshilov A. S., Voloshko Y. B., Ruzhilova O. V. Issledovanie nizkoorbital'nogo dopolneniya na vysote 2000 km dlya sistemy glonass s vozmozhnost'yu polnogo pokrytiya zemli pri razlichnykh variantakh shiriny diagrammy napravlenosti anten kosmicheskogo apparata [Study of low-orbital augmentation at 2000 km for the GLONASS system with full Earth coverage capability with various antenna bandwidth variants of the spacecrafts]. Vestnik SibGUTI, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 38-51. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-38-51>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Plykin K. R., Valikhanov M. M.,
Vereshchagin A. N., Pustoshilov A. S.,
Voloshko Y. B., Ruzhilova O. V., 2025
The article was submitted: 20.01.2025;
revised version: 20.03.2025;
accepted for publication 29.04.2025.

Reference

1. Leonidov N., Voloshko Y., Vygonkiy Y. Promising directions for the development of the GLONASS orbital grouping using CDMA - a new type of signal: Proceedings of the European Navigation Conference (ENC 2020) / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) German Institute of Navigation. - Germany, Dresden, 2020. - 11 p.
2. Shilko I. I., Voloshko Yu. B., Ruzhilova O. V., Anisimova O. A. Analysis of options for modernizing the structure of the GLONASS orbital grouping to ensure its competitiveness // Spacecraft and Technologies. 2019. Vol. 3. No. 1 (27). P. 5-12.
3. Meshcheryakov V. M., Braginets V. F., Sukhoi Yu. G. Architecture of the GLONASS orbital grouping ensuring global fulfillment of promising requirements for the average value of the spatial geometric factor // Engineering Journal: Science and Innovations. 2018. No. 10. 13 p.
4. Stupak G. G., Revnivikh S. G., Ignatovich E. I., Kurshin V. V., Betanov V. V., Panov S. S., Bondarev N. Z., Chebotarev V. E., Balashova N. N., Serdyukov A. I., Sintsova L. N. Selection of the structure of the orbital grouping of the promising GLONASS system // Research of the science city. Cosmonautics. 2013. No. 3-4 (6). P. 3-11.
5. Stupak G. G., Revnivikh S. G., Ignatovich E. I., Kurshin V. V., Betanov V. V., Panov S. S., Bondarev N. Z., Chebotarev V. E., Balashova N. N., Serdyukov A. I., Sintsova L. N. Study of options for improving the structure of the GLONASS GNSS orbital grouping until 2020 and beyond, taking into account bringing its composition to 30 satellites by 2020 // Bulletin of the Siberian State Agrarian University. 2013. No. 6 (52). P. 23-31.
6. Stupak G. G., Kurshin V. V., Betanov V. V. Orbital rebuilding of the GLONASS system // Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Research and Development. 2013. Issue 76. P. 44-51.
7. Plykin K. R., Chursina O. A., Valikhanov M. M., Voloshko Yu. B. Study of the GLONASS system operating area with various OG design options // Reshetnev Readings. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference. Krasnoyarsk, 2020. P. 227-229.
8. GLONASS Global Navigation Satellite System. Open Service Performance Standard (STEHOS), Korolev 2019. Edition 2.2 (6.2019)
URL: <https://glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos.pdf>.

9. JSC Information Satellite Systems Reshetnev. Newspaper "Siberian Satellite ". GLONASS. 2022. No. 16 (554). P. 3
URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/newspaper/newspaper-2022/newspaper-554.pdf>.
10. Interdisciplinary journal of navigation technologies "GLONASS Bulletin". News "Development of low-orbit augmentation of the GLONASS system will ensure navigation in buildings" dated July 10, 2024 URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/razvitie-nizkoorbitalnogo-dopolneniya-sistemy-glonass-obespechit-navigatsiyu-v-zdaniyakh/>.
11. Tyler G. R. Reid, Todd Walter, Per K. Engel, David Lawrence, H. Stewart Cobb, Greg Gutt, Michael O'Conner, David Whelan. Navigation from Low Earth Orbit // Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, Volume 2. 2021. P. 1359 – 1412.
12. Miller Noah S., Koza J. Tanner, Morgan Samuel C., Martin Scott M., Neish Andrew, Grayson Robert, Reid Tyler. SNAP: A Xona Space Systems and GPS Software-Defined Receiver, // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey. 2023. PP. 897-904.
13. Anpilogov, V., Gritsenko, A. Optimal Low-Earth Orbit Constellations. Satellite Communications and Broadcasting, 2022, Pp. 44-47.
14. Leonidov, N. V. Autonomous algorithms for monitoring the integrity of the navigation field in relation to GNSS GLONASS. Space Vehicles and Technologies. 2021. Pp. 44-50. DOI: 10.26732/j.st.2021.1.05.
15. Mathematical package "Platform in satellite scenario" of the Matlab program URL: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/ug/satellite-scenario-overview.html>.
16. Mathematical package "satelliteScenario" of the Matlab program URL: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/ug/satellitescenario.html>.
17. Leonidov N. V., Mitina M. V. Image of a low-orbit addition to the GLONASS orbital grouping // Measurements. Monitoring. Management. Control. 2021. No. 2. Pp. 66-70.
18. Vallado, D., Crawford, P. SGP4 orbit determination // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. 2008. 6770 p.
19. Interface Control Document. General Description of the Code Division Multiple Access System – Introduction. 2016. – Moscow: Russian Space Systems. 2016. 133 p.
20. GOST R 52928-2010. Global satellite navigation system. Terms and definitions: national. Standard of the Russian Federation: approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 9, 2010 No. 353-st: replacing GOST R 52928-2008: date of introduction 2014-07-01. (System of standards on information, librarianship and publishing) // Code: electronic. Fund of legal and normative. – tech. Inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110468>.
21. FTP archive of the Applied Consumer Center URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru>.
22. GOST 32454-2013. Global navigation satellite system. Parameters of the radio navigation field. Technical requirements and test methods: national standard of the Russian Federation: approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated April 15, 2014 No. 355-st: introduced for the first time: date of introduction 2014-07-01. (System of standards on information, librarianship and publishing) // Code: electronic. fund of legal and normative. – tech. information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110468>.

Konstantin R. Plykin

Postgraduate student of the Department of Radio Engineering of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of the Siberian Federal University (Russia, 660074, Krasnoyarsk, Akademika Kirenskogo St., 28), 3rd category design engineer of JSC «Scientific production enterprise «Radiosviaz» (Russia, 660021, Krasnoyarsk, Dekabristov St., 19), phone: 8-913-574-17-80, e-mail: kplykin@sfu-kras.ru.

Marat M. Valikhanov

Cn. Of Sci (Engineering), Associate Professor of the Department of Radio Engineering of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of the Siberian Federal University (Russia, 660074, Krasnoyarsk, Akademika Kirenskogo St., 28), phone: 8-913-517-37-65, e-mail: mvalikhanov@sfu-kas.ru.

Anton N. Vereshchagin

Senior Lecturer of the Department of Radio Engineering of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of the Siberian Federal University (Russia, 660074, Krasnoyarsk, Academician Kirenskogo St., 28), phone: 8-923-306-84-43, e-mail: avereshagin@sfu-kras.ru.

Alexander S. Pustoshilov

Cn. Of Sci (Engineering), Associate Professor of the Department of Radio Engineering of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of the Siberian Federal University (Russia, 660074, Krasnoyarsk, Academician Kirensky St., 28), phone: 8-913-596-99-58, e-mail: apustoshilov@sfu-kras.ru.

Yuri B. Voloshko

Leading design engineer of JSC Information Satellite Systems Reshetnev (Russia, 662972, Zheleznogorsk, Lenin St., 52), phone: 8-983-154-58-70, e-mail: ubv@iss-reshetnev.ru.

Olga V. Ruzhilova

Leading design engineer of JSC Information Satellite Systems Reshetnev (Russia, 662972, Zheleznogorsk, Lenin St., 52), phone: 8-913-550-01-52, e-mail: ruj@iss-reshetnev.ru.