

На правах рукописи



Зай Яр Вин

**ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ
ДОПОЛНЕНИЯ ГЛОНАСС ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность: 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ)

Научный руководитель **Старков Александр Владимирович**, доктор технических наук, доцент кафедры «Системный анализ и управление» МАИ

Официальные оппоненты: **Дивеев Асхат Ибрагимович**, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Болкунов Алексей Игоревич, начальник лаборатории Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения АО«ЦНИИмаш»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится « 20 » мая 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=120728

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.12, д.т.н.

А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Высокая точность и стабильность потребительских характеристик российской глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) позволяет рассматривать ее в качестве основы координатно-временного и навигационного обеспечения для других стран. При этом, одним из ключевых факторов, влияющих на выбор ими предпочтительной навигационной системы, является обеспечение требуемых уровней точности, доступности и непрерывности радионавигационного поля в условиях сложного рельефа местности, городской застройки и в районах с высоким вегетационным индексом. В этом смысле, наиболее перспективными рынками являются страны БИМТЭК (BIMSTEC, Bengal Initiative for Multi-Sectoral Technical and Economic Cooperation, сокращенно - Инициатива Бенгальского залива, Бангладеш, Индия, Мьянма, Шри-Ланка и Таиланд), которые за последние 10 лет показывают почти двукратное увеличение использования навигационных услуг.

Для обеспечения способности выдерживать конкуренцию с другими глобальными навигационными спутниковыми системами (конкурентоспособности) среди стран этого региона ГЛОНАСС должна иметь характеристики в сложных ландшафтных условиях, при которых навигационные космические аппараты видны под углами 25° и более над линией горизонта, на одном уровне, и даже лучше, чем ее зарубежные аналоги. Это может быть достигнуто, с одной стороны, за счет совершенствования наземного и космического сегмента самой ГЛОНАСС, а с другой – за счет дополнения ее навигационными космическими аппаратами в орбитальном построении, отличающимся от классического построения ГЛОНАСС и позволяющем повысить ее характеристики для выбранных региональных потребителей. При этом, основу системы по-прежнему должна составлять существующая группировка ГЛОНАСС и ее российский наземный контур управления (НКУ). Данное обстоятельство требует выработки новых системных и прикладных решений.

Таким образом, вопрос поиска новых научно обоснованных технических решений важной научной задачи формирования облика орбитальной группировки (ОГ) дополнения ГЛОНАСС для повышения её конкурентоспособности среди региональных потребителей является актуальной и практически важной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Анализ публикаций на данную тему и результаты работ, выполненных авторами: В.А. Бартеневым, В.В. Бетановым, А.И. Болкуновым, Ю.Л. Булыниным, Е.И. Игнатовичем, С.А. Каплевым, С.Н. Карутиным, В.Е. Косенко, М.Н. Красильщиковым, В.В. Куршиным, В.В. Малышевым, И.В. Можаровым, С.А. Пановым, В.Н. Почукаевым, С.Г. Ревнивых, М.Ф. Решетневым,

А.В. Старковым, А.В. Федоровым, В.Е. Чеботаревым, В.И. Яремчуком и др., позволил остановиться на выборе высокоорбитального космического комплекса (ВКК) в качестве приоритетной архитектуры орбитальной группировки, выявить основные особенности построения и функционирования ВКК дополнения ГЛОНАСС, а также пути исследований, направленных на определение общих принципов и методов решения поставленной задачи. В работах этих и других авторов излагались теоретические основы и подходы к построению орбитальных дополнений ГЛОНАСС исследовались модели движения и принципы управления КА, предлагались методики оценки эффективности ГЛОНАСС.

Вместе с тем, в настоящее время при формировании облика ВКК появилась объективная возможность учесть требования потребителей, находящихся как на территории Российской Федерации (РФ), так и стран БИМТЭК на базе перспективных навигационных космических аппаратов и существующего наземного контура управления. В рамках этой системы остается еще ряд нерешенных задач, в частности, связанных с созданием методики и реализующих её унифицированных программно-математических средств.

Объект исследования

В представленной диссертационной работе объектом исследования является Российская глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС). Поскольку ее базовым элементом является орбитальная группировка (ОГ) навигационных космических аппаратов (НКА), особое внимание в работе уделяется выбору параметров ее построения и стратегии управления.

Предмет исследования

Методика формирования облика орбитальной группировки высокоорбитального космического комплекса дополнения ГЛОНАСС, а также необходимые алгоритмические средства, являются предметом исследования данной диссертационной работы.

Цель диссертационной работы

Данная работа направлена на формирование теоретического и прикладного задела, необходимого при решении задачи выбора структуры орбитальной группировки перспективной системы ГЛОНАСС.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **научно-технические задачи**:

1. Проводится системный анализ и формализация задачи совершенствования структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС с учетом требований региональных потребителей.

2. Исследуются требования к качеству предоставления навигационных услуг, проводится их анализ и формируются показатели эффективности.

3. Формулируется постановка и методика решения задачи разработки облика орбитальной группировки дополнения глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

4. Разрабатывается система взаимосвязанных математических моделей:

- модель эволюции орбиты НКА ВКК;
- модель расчета стратегии коррекций для поддержания номинальных параметров орбиты;
- модель прогноза возможных интервалов обмена данными между НКА и наземным комплексом управления;

5. Определяются принципы построения и технический облик необходимого программно-математического обеспечения (ПМО).

6. С помощью созданного ПМО проводится математическое моделирование и формируются предложения по вариантам облика ОГ ВКК улучшающих характеристики ГЛОНАСС.

Научная новизна

В работе изложены научно обоснованные технические решения, обладающие новизной и научной значимостью:

1. Впервые предложено рассматривать задачу формирования облика высокоорбитального космического комплекса дополнения орбитальной группировки с точки зрения повышения конкурентоспособности ГЛОНАСС для потребителей, находящихся на территории БИМТЭК и Российской Федерации.

2. Обоснован переход от вектора разнородных показателей эффективности к векторному показателю «Доступность», включающего в себя интегральную и гарантированную доступности, а также улучшение мгновенного геометрического фактора.

3. Предложены единые, взаимосвязанные модели для расчета показателей доступности с учетом различных вариантов орбитальных построений и стратегий управления.

4. Для предлагаемых новых орбитальных построений сформированы алгоритмы управления НКА в случае реализации стратегии пассивной и активной компенсации деградации номинальных орбитальных параметров.

5. Определены требования, предъявляемые к новому специализированному программно-математическому обеспечению и предложена методика его построения.

Практическая значимость результатов исследования

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение для развития и повышения конкурентоспособности ГЛОНАСС. Их практическая значимость заключается в следующем:

1. Подтверждена возможность одновременного существенного повышения параметров доступности навигационного сигнала в экваториальном широтном поясе для стран БИМТЭК и на территории Российской Федерации.

2. Подтверждена возможность повышения уровня автоматизации при решении различных задач формирования облика орбитальной группировки дополнения ГЛОНАСС.

3. Предложен подход к формированию стратегии коррекций НКА ОГ ГЛОНАСС.

4. Проведены исследования деградации орбитальных группировок и сформированы предложения по их применимости в качестве дополнения ГЛОНАСС.

5. Проведены исследования и сформированы предложения по использованию пассивного метода минимизации деградации орбитальной группировки за счет упреждающего подбора номинальных параметров группировок.

6. Проведены исследования и сформированы предложения по использованию активного поддержания параметров орбитальных структур.

Основные результаты работы использованы в рамках выполнения государственного задания по проекту № 9.7505.2017/БЧ «Разработка методики системного проектирования оптимальных структур орбитальных многоцелевых группировок КА, принципов и методов их построения в целях обеспечения реализации задач наблюдения, навигации и связи», а также в учебном процессе МАИ

Методология и методы исследования

В качестве методологической основы используется системный подход. На нем основывается раздельное формирование моделей и алгоритмов функционирования навигационных космических аппаратов и наземного комплекса управления, выбора показателей эффективности и ограничений с последующей отработкой в рамках программно-математического обеспечения, методический и алгоритмический аппарат которого позволяет решать широкий круг задач по формированию облика орбитальных группировок.

Основными методами исследования, используемыми в работе, являются методы системного анализа, динамики полета, оптимального управления и обработки информации. При программной реализации математического обеспечения используются принципы объектно-ориентированного программирования, открытой архитектуры и многозадачности.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Теоретические основы и методика решения задачи повышения конкурентоспособности ГЛОНАСС для региональных потребителей за счет введение в её состав высокоорбитального космического комплекса.

2. Архитектура и состав взаимосвязанных математических моделей, составляющие основу методики формирования облика орбитальной группировки дополнения ГЛОНАСС.

3. Методика создания программно-математического обеспечения для проведения исследований и формирования предложений по выбору орбитальной структуры в совокупности с методами компенсации её деградации.

4. Результаты применения предлагаемой методики в части сравнения выбранных структур орбитальных группировок ВКК, исследования методов и технологий, уменьшающих или компенсирующих их деградацию.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием современной теории системного анализа и оптимального управления, использованием апробированного математического аппарата, обоснованием полученных результатов математическими расчетами и проведенным сравнительным анализом полученных результатов экспериментальной отработки с реальными данными.

Апробация работы проведена на научно-технических семинарах кафедры «Системный анализ и управление» МАИ. Результаты работы докладывались и получили одобрение на научно-технических конференциях: 22-й, 23-ей и 24-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (2017, 2018, 2019 г.г.), XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2018 г.), 15-й и 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (2016, 2017 г.г.), 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS 2017), 4th IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS 2018) и др.

Личный вклад и публикации

Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Эти исследования включают формализацию задачи, техническую и математическую постановку, разработку моделей, применение вычислительных методов, создание программно-математического обеспечения, расчеты и анализ результатов. Из совместных работ в диссертацию вошел только тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен

ссылками. Основные результаты опубликованы в 12 работах, из которых 4 – в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, соответствующих специальности 05.13.01 (авиационная и ракетно-космическая техника), 3 – опубликованы иностранных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнена формализация задачи совершенствования структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС с учетом требований региональных потребителей. При анализе как зарубежных систем, так и российской ГЛОНАСС выявлены недостатки, которые, с точки зрения их конкурентоспособности в странах с перспективным рынком, ориентированным на потребление навигационных услуг, таким как страны БИМТЭК, носят критический характер. Так, например, в сложных условиях рельефа, городской застройке, а также в районах с высоким вегетационным индексом отмечаются достаточно большие интервалы времени, когда решение навигационной задачи невозможно (см. Рисунок 1).

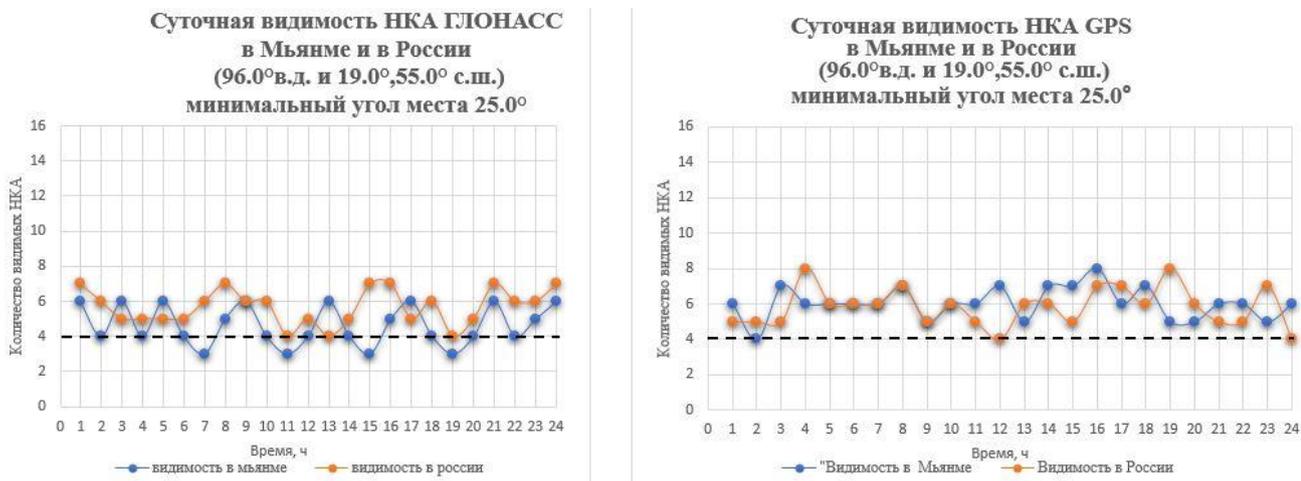


Рисунок 1 – Пример суточной доступность спутников ГЛОНАСС и GPS в сложных условиях

В конечном итоге, устранению этого недостатка за счет дополнения ГЛОНАСС перспективными навигационными космическими аппаратами (НКА) и посвящена данная работа. В главе проведена декомпозиция ГНСС как сложной информационной организационно-технической системы, потребительских характеристик ее элементов и влияние на них структуры орбитальной группировки. Рассмотрены различные варианты орбитальных построений, которые условно можно объединить в две группы:

- использующие орбитальные построения типа ГЛОНАСС с изменениями высоты орбиты, количества плоскостей и спутников в этих плоскостях;
- использующие штатную группировку, дополненную высокоорбитальным космическим комплексом (ВКК), орбиты НКА которого в номинале имеют постоянную трассу.

Для первой группы основные орбитальные параметры орбит остаются такими же, как и в штатной группировке ГЛОНАСС. А наращивание происходит за счет дополнительных орбитальных сегментов с предпочтительным сохранением орбитального периода и повторяемости трасс. Основной сложностью здесь является то, что в рамках функционирующей системы необходимо решить очень сложные задачи: или существенное изменение параметров существующей орбитальной группировки (ОГ), или создание новой ОГ параллельно с существующей на новых плоскостях с постепенным включением запускаемых КА в целевое использование

Для орбит второй группы характерным является дополнение штатной орбитальной группировки высокоорбитальным космическим комплексом с навигационными космическими аппаратами на орбитах типа QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), геосинхронных наклонных орбитах (ГСНО), М15 а также высокоэллиптических орбитах типа «Молния».

В работе предложено провести анализ улучшения характеристик навигации региональных потребителей за счет развертывания дополнительного высокоорбитального сегмента и сформировать облик такой орбитальной группировки, взяв за основу орбиты QZSS, ГСНО и М15. Сложность задачи оптимизации здесь заключается в наличии большого числа показателей. В работе проведена систематизация этих показателей, к которым относятся:

- точность навигационных определений, характеризуемая набором характеристик, отражающих уровень погрешностей навигационных определений
- эксплуатационная доступность, включающая в себя мгновенную, обобщенную и гарантированную доступности
- непрерывность навигационного обслуживания потребителей ГНСС в течение заданного интервала времени
- целостность ГНСС с точки зрения анализа выполнения требований по точности, доступности и непрерывности при условии выведения одного или нескольких НКА из обслуживания.

Все показатели качества зависят от баллистической структуры и характеристик наземного комплекса. В нашем случае предложено использовать метод объективного свертывания и перейти к частным показателям, характеризующим уровень доступности навигационного сигнала региональному Потребителю, а именно:

- интегральную доступность – осредненную по времени величину доступности двух и более НКА ВКК в заданном районе
- гарантированную доступность – определяемую видимостью 0, 1, 2 и более НКА ВКК за заданный промежуток времени в заданном районе;

- улучшению мгновенного геометрического фактора (DOP - Dilution Of Precision) дополненной ОГ по отношению к основной группировке ГНСС.

Решаемая задача определена как задача разработки облика орбитальной группировки дополнения ГНСС обеспечивающей наилучшие характеристики спутниковой навигации потребителей на территории РФ и стран БИМТЭК, как совместный выбор проектных параметров орбитальной группировки и стратегии коррекцией из условия улучшения параметров доступности. Предложена методика, согласно которой проектирование орбитальной группировки спутниковой системы предполагается проводить в несколько этапов (итераций), используя на каждой последующей итерации все более точную модель системы.

1. Этап. Выбор рациональных параметров структуры орбитальной группировки ВКК. В первом приближении спутниковая система рассматривается как идеальная. Предполагается, что возмущающие факторы (погрешности выведения, отказы, ошибки исполнения коррекций и др.) отсутствуют. Нет эволюции системы. Нет потребности в управлении. Предполагается также, что параметры спутников и бортовой аппаратуры известны. В этом случае задача проектирования спутниковой системы сводится к выбору параметров орбитальной группировки из условия обеспечения требуемой целевой эффективности.

2. Этап. Анализ деградации выбранных номинальных структур группировок НКА под воздействием возмущающих факторов различного типа. В общем случае, нарушения структуры орбитальной группировки могут быть сведены к следующим интегральным показателям:

- изменению относительного положения (межспутниковых расстояний) отдельных спутников в одной орбитальной плоскости (по аргументу широты, т.е. вдоль орбиты);
- фазовому расхождению спутников в различных плоскостях (иначе говоря, к относительным групповым сдвигам НКА в различных плоскостях);
- изменению ориентации каждой орбитальной плоскости относительно других за счет изменения наклонов и относительных значений положения узлов орбит (более строго – прямых восхождений восходящего узла).

Эти, в свою очередь приводит к деградации общесистемных параметров доступности.

Для компенсации влияния представленных факторов необходимо:

- провести анализ деградации выбранных номинальных структур;
- провести исследование пассивного метода по минимизации деградации ОГ за счет упреждающего подбора номинальных параметров группировок;
- разработать требования по активному поддержанию параметров орбитальных структур.

3. Этап. Определение стратегии проведения коррекций орбитальных параметров для обеспечения требований по поддержанию структуры группировок НКА. Варианты ситуаций, когда необходима коррекция:

- абсолютное отклонение положения спутника на орбите от расчетного более допустимого (определяемого, например, предельным отклонением по времени пролета над заданной точкой);
- фактическое относительное положение соседних спутников таково, что нарушаются общесистемные требования.

Несмотря на то, что в системном плане второй вариант формирования стратегии коррекций более предпочтителен, в случае нарушения требуемых условий их восстановление возможно различными путями, предполагающими построение новых вариантов орбитальной структуры группировки, которых может быть множество. Строго говоря, выбирать вариант управления при этом нужно, исходя из минимизации общесистемных показателей. Однако установить непосредственную связь между управлением на каждом шаге и выбранными нами показателями не представляется возможным. Поэтому в работе предлагается использовать «жесткое управление», при котором, в случае нарушения некоторых заданных условий, происходит коррекция орбитальных параметров, возвращающая спутники в расчетное положение или область, удовлетворяющую ограничениям на отклонение от расчетного абсолютного положения НКА.

На каждом этапе решается задача многокритериальной оптимизации относительно параметров доступности. Поскольку размерность критерия «Доступность» не велика, то в качестве метода отбора при многокритериальной оптимизации выбран метод Парето, основой которого является формирование множества Парето и принятие решения о выборе в нем наиболее предпочтительного. Это не обеспечивает полного решения задачи, но значительно снижает множество альтернатив, для которых еще необходимо выбрать единственное наилучшее.

Вторая глава посвящена формированию взаимосвязанных математических моделей НКА орбитальной группировки:

- модели орбитального построения: модели эволюции орбиты НКА ОГ ГЛОНАСС и ВКК;
- модели обеспечения стабильности трасс НКА ОГ ВКК (стратегии коррекций);
- модели расчета параметров доступности, которые включают в себя: модель определения возможных интервалов времени видимости отдельного НКА Потребителем; модели расчета параметров доступности; модель расчетов интервалов планового технического обслуживания НКА; модель прогноза

возможных интервалов времени для обмена информацией между НКА и НКУ.

Результатом применения моделей являются:

- результаты расчета видимости НКА и мгновенного геометрического фактора как штатной ГНСС, так и дополненной ОГ НКА ВКК;
- множество интервалов времени проведения возможных сеансов связи НКА ↔ НКУ;
- множество интервалов времени и затраты характеристической скорости, связанные с необходимостью проведения коррекций орбиты;

В качестве модели движения для определения интервалов времени принята система дифференциальных уравнений для описания пространственного движения космического аппарата в оскулирующих элементах:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= 2r\sqrt{\frac{p}{\mu}}\sum g_y; & \frac{de}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}}\left\{\sin\vartheta\sum g_x + \left[\cos\vartheta + \frac{r}{p}(\cos\vartheta + e)\right]\sum g_y\right\} \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}}\frac{\sin u}{\sin i}\sum g_z; & \frac{di}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}}\cos u\sum g_z \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} + \frac{\cos\vartheta}{e}\sqrt{\frac{p}{\mu}}\sum g_x - \frac{\sin\vartheta}{e}\left(1 + \frac{r}{p}\right)\sqrt{\frac{p}{\mu}}\sum g_y; & \frac{du}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} - \frac{r}{\sqrt{\mu p}}\frac{\sin u}{\tan i}\sum g_z \end{aligned} \quad (1)$$

с учетом влияния нецентральной гравитационной природы Земли, возмущений гравитационной природы от Луны и Солнца, давления солнечного света, торможения атмосферой и работы корректирующей двигательной установки.

Основными возмущениями типовых орбит НКА являются: долгопериодические возмущения гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла. В работе представлены математические модели расчета коррекции соответствующих параметров в импульсной постановке на основе существования циклов смещения трассы НКА.

Отдельно рассмотрен случай, когда фазовая траектория, описывающая эволюцию географической долготы восходящего узла может быть записана в виде:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k[(1 + \mu_k)u_k] + D_k + \xi_k \quad (2)$$

где k – число шагов; x_k – n -мерный вектор состояния системы; u_k – m -мерный вектор управления; A_k – квадратная матрица размером $n \times n$; B_k – прямоугольная матрица размером $n \times m$; D_k – неслучайный вектор размером n ; μ_k – мультипликативная ошибка управления; ξ_k – вектор ошибок прогноза вектора состояния x_{k+1} ;

Это соответствует ситуации, описывающей изменения географической долготы восходящего узла орбит типа QZSS, ГСНО и М15. Для этих орбит автором адаптирован алгоритм расчета коррекции на основе использования достаточных

условий оптимальности. Согласно этому алгоритму оптимальное с точки зрения квадратичного критерия $J = \min_{\{u_k\}} M[x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}]$. управление представляет линейную функцию:

$$u_k = -L_k x_k - d_k \quad (3)$$

где коэффициенты обратной связи L_k и смещение d_k вычисляются с помощью рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned} L_k &= \gamma_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1} A_k, \quad d_k = \gamma_k^{-1} B_k^T (\lambda_{k+1} D_k + G_{k+1}), \\ \gamma_k &= (1 + \sigma_k^2) B_k^T \lambda_{k+1} B_k, \quad \lambda_k = A_k^T \lambda_{k+1} A_k - L_k^T \gamma_k L_k, \\ G_k &= A_k^T \lambda_{k+1} D_k + A_k^T G_{k+1} - \gamma_k d_k L_k^T, \\ c_k &= c_{k+1} + sp[F_k^T \lambda_{k+1} F_k K_k] + D_k^T \lambda_{k+1} D_k - \gamma_k d_k^2 + 2G_{k+1}^T D_k \\ \lambda_{N+1} &= \lambda; \quad G_{N+1} = 0; \quad c_{N+1} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом, учитывая особенность решения, связанную с возможностью заранее определить состояние КА в установившемся режиме:

$$x^* = (E - \tilde{A})^{-1} \tilde{C} \quad (5)$$

можно заранее рассчитать возможные интервалы времени проведения коррекций.

Для формирования возможности использования НКА для решения задачи местоопределения Потребителя, а также возможных интервалов времени проведения сеансов связи между отдельным НКА и НКУ используется модель прогноза (1),

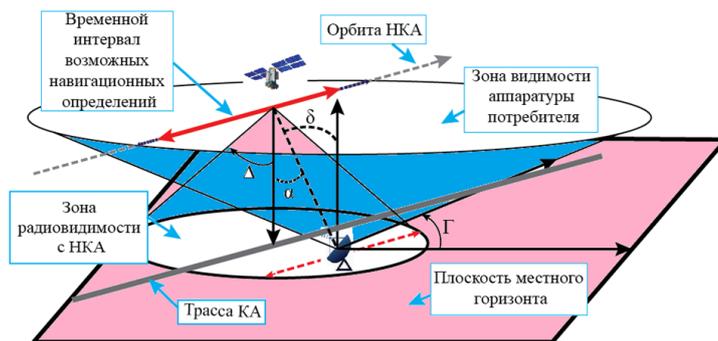


Рисунок 2 – Иллюстрация возможности проведения сеанса связи КА↔ППИ

с помощью которой определяется взаимная видимость НКА↔НКУ (рисунок 2)

Для расчета параметров доступности необходимо определять процент времени на заданном интервале, в течение которого эти факторы или их составляющие, рассчитанные по НКА, используемым по целевому назначению, не превышает заданного значения для любой точки в зоне действия системы.

Исходными данными при этом являются:

- эталонные $X_э, Y_э, Z_э$, штатные $X_{шт}, Y_{шт}, Z_{шт}$, либо иные координаты НКА ГЛОНАСС, дополненные ОГ ВКК в условной земной системе координат;
- признаки пригодности НКА к использованию;

Рассчитываемыми параметрами на основе которых определяются параметры доступности Потребителя являются:

- число видимых НКА Потребителем;
- мгновенный геометрический фактор;
- мгновенная доступность навигационного поля,
- максимальный перерыв навигации,
- среднее значение доступности навигационного поля на произвольном интервале;

Определение параметров доступности навигации на интервале от T_n до T_k производится с шагом по времени ΔT не более 5 минут и с шагом по широте B и долготе L не более 1 градуса. В соответствии с определением при расчете доступности навигации учитываются только НКА ГНСС пригодные к использованию. Определение доступности может проводиться как для всей поверхности Земли, так и для некоторых заданные минимальными и максимальными значениями широты B_{MIN}, B_{MAX} и долготы L_{MIN}, L_{MAX} регионов. При расчете доступности по территории используются следующие значения:

- для Российской Федерации: (30° в.д., 90° с.ш.), (170° в.д., 50° с.ш.)
- для стран БИМТЭК: (72° в.д., 29° с.ш.), (109° в.д., 2° с.ш.)

Для каждой точки с координатами B_J, L_K на каждую эпоху T_I по всем пригодным к использованию НКА ГНСС углах места более заданных (5°, 25° и 40°) определяется признак улучшения пространственного геометрического фактора PDOP, которое используется для расчета мгновенной доступности навигации δ_{JK}^I .

$$\delta_{JK}^I = \begin{cases} 1, & \text{при } PDOP \leq PDOP_{mp} \\ 0, & \text{при } PDOP > PDOP_{mp} \end{cases}, \quad I=1, N_T, \quad J=1, N_B, \quad K=1, N_L \quad (6)$$

Значение доступности навигации для заданного региона определяется в результате осреднения мгновенной доступности:

$$D = \frac{\sum_{I=1}^{N_T} \sum_{J=1}^{N_B} \sum_{K=1}^{N_L} (\delta_{JK}^I \cos B_J)}{N_T N_L \sum_{J=1}^{N_B} \cos B_J} \cdot 100\% \quad (7)$$

Расчет параметров доступности навигационных определений предполагает вычисление мгновенного локального геометрического фактора. Функция $Pdop(\varphi_i, \lambda_j)$ – локальный геометрический фактор в точке с географическими координатами $\{\varphi_i, \lambda_j\}$ определяется следующим образом:

$$Pdop(\varphi_i, \lambda_j) = \frac{1}{n_k} \sum_{n=1}^{n_k} P(\varphi_i, \lambda_j, t_n) \quad (8)$$

где $P(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$ – массив мгновенных геометрических факторов в точке $\{\varphi_i, \lambda_j\}$, отсортированный по возрастанию значений.

В случае дополнения штатной ГНСС дополнительными НКА и учитывая тот факт, что для конкретных регионов можно заранее определить число недостающих для решения навигационной задачи НКА, в формуле (7) можно уйти от расчетов по всему прогнозируемому интервалу и перейти к использованию мгновенного геометрического фактора, рассчитываемого на интервале повторяемости номинальной группировки, тем самым значительно сократив время вычислений. Тогда интегральная доступность – это осредненная по времени величина доступности двух и более НКА ВКК в заданном районе, гарантированная доступность определяется видимостью 0, 1, 2 и более НКА ВКК за заданный промежуток времени в заданном районе, а улучшение мгновенного геометрического – это осредненная по региону функция, значение которой в каждой точке равно 0, если улучшения DOP основной ГНСС за счет использования КА ВКК нет, и 1 в противном случае.

В результате модель орбитальной группировки ВКК представляет собой модели высокоточного прогнозирования векторов состояния НКА на фоне которых производятся периодические коррекции поддержания их трассы. Параметры доступности навигационного сигнала рассчитываются как с учетом видимости НКА ГЛОНАСС и ВКК, так и с учетом планового технического обслуживания НКА ВКК.

В третьей главе предложена методика построения программно-математического обеспечения (ПМО) средств анализа вариантов построения орбитальных группировок, которое позволяет исследовать варианты структур высокоорбитального сегмента, принципов и методов их построения в целях эффективного обеспечения реализации навигационных услуг, анализировать ухудшение качества функциональных возможностей ВКК вследствие деформации под воздействием возмущающих факторов различного типа и строить стратегию коррекции движения КА.

На основе проведенной декомпозиции задачи предложено ввести в состав ПМО три модуля (рисунок 3).

Модуль прогнозирования неуправляемого движения НКА ОГ «Прогноз» служит для определения орбитальных параметров космических аппаратов ОГ с учетом их эволюции на заданном участке функционирования под действием различных возмущений: гравитационного поля Земли, притяжения Луны и Солнца.

Модуль «Доступность» определения параметров доступности НКА ОГ служит для оценки ухудшения качества функциональных возможностей ВКК под воздействием возмущающих факторов со стороны гравитационного поля Земли, притяжения Луны и Солнца на состав и структуру ОГ.

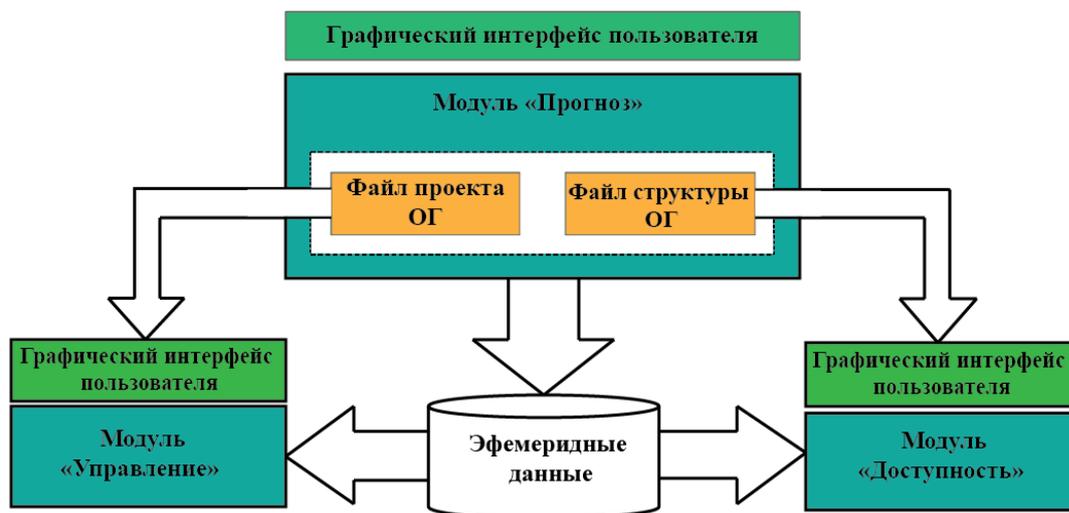


Рисунок 3 – Структура программно-математического обеспечения

Модуль «Управление» расчета стратегии коррекций НКА ОГ в части определения затрат характеристической скорости и количества коррекций периода обращения (для удержания ГДВУ), эксцентриситета и аргумента перигея орбит ВКК на сроке активного существования НКА ВКК.

Главной особенностью предложенной в работе методики и технического облика ПМО является:

- возможность внешнего описания вида и параметров математических моделей расчета показателей доступности;
- оптимизации вычислительных процедур с учетом уменьшения времени вычислений;
- возможность независимого использования модулей друг от друга;

В четвертой главе представлены результаты отработки предложенной методики для формирования облика орбитальной группировки высокоорбитального космического комплекса дополнения ГНСС. Варианты исследованных орбитальных построений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры структуры ОГ НКА

Количество трасс	1, 2
Число КА	4, 6
Число плоскостей	2 (по 2 или 3 КА), 3 (по 2 КА), 4 (по 1 КА), 6 (по 1 КА)
Число зенитных точек	1, 2
Значения географических долгот узлов ($\lambda\Omega$) или зенитных точек	(100°,100°), (60°,120°), (60°,130°), (60°,130°), (60°,140°), (50°,140°)

В качестве базовых орбит многоцелевых КА рассмотрены орбиты типа ГСНО, QZSS, M15, которые приведены в таблице 2. Номинальное значение наклона для всех типов орбит КА – 64.8°.

Таблица .2 – Базовые орбитальные группировки

Тип КА	Высота перигея км	Высота апогея км	Эксцентриситет	Аргумент перигея град.
ГСНО	35790	35790	0.001	270
QZSS	32750	38820	0.072	270
M15	29470	42120	0.15	270

При этом параметры доступности рассчитывались для всех вариантов ОГ в зависимости от орбитальной обстановки:

- функционируют все КА;
- развертывание ОГ ВКК по плоскостям;
- функционируют все КА, за исключением одного НКА, выведенного на техническое обслуживание (коррекция орбиты, уточнение эфемеридной информации и т.п.).

По результатам проведенных вычислений сформированы предложения по выбору вариантов облика.

1. Сравнить ОГ между собой необходимо при угле маски 25 град. и выше, т.к. При маске 5 град. эволюция орбит НКА ВКК не приводит к ухудшению параметров доступности выбранных региональных потребителей.

2. Все НКА рассмотренных орбитальных группировок наблюдаются НКУ на территории РФ как в режиме «И», так и «ИЛИ» не менее 7 часов.

3. Использование в качестве одного из показателей улучшение мгновенного геометрического фактора практически не влияет на выбор ОГ. Достаточно использовать гарантированную и интегральную доступности. При этом происходит значительное уменьшение объема вычислений.

4. Для рассмотренных вариантов ОГ типа QZSS наиболее предпочтительным является однотрассовый вариант (см. Рисунок 4, ОГ QZSS с ГДБУ 100 град, наклоном 64.8 град). Другие варианты (в том числе трехтрассовый) с точки зрения доступности примерно одинаковы.

5. Для рассмотренных вариантов ОГ типа M15 однотрассовый вариант также показал лучшие результаты (ОГ M15 с ГДБУ 100 град, наклоном 64.8 град). Тем не менее, остальные варианты (в том числе трехтрассовый) также имеют высокие показатели доступности. Поэтому однозначно говорить о преимуществе однотрассового варианта нельзя.

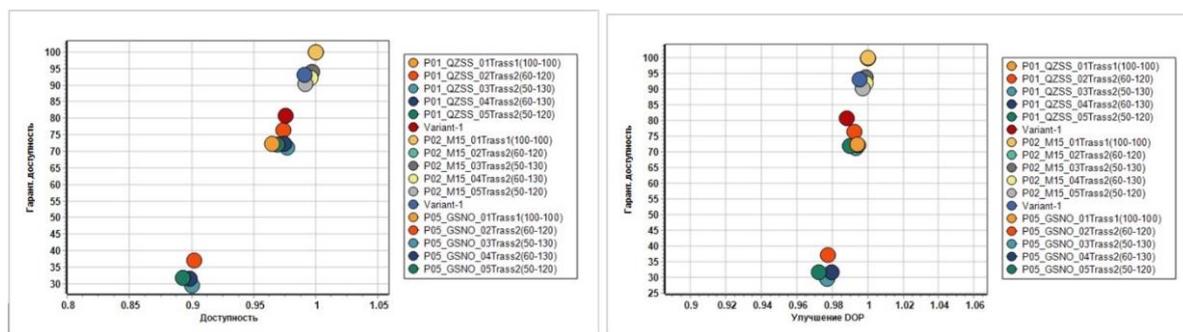


Рисунок 4 – Сравнение ОГ ВКК

6. Для рассмотренных вариантов ОГ типа ГСНО однотрассовый вариант также показал лучшие результаты (ОГ ГСНО с ГДВУ 100 град, наклоном 64.8 град). Другие варианты (в том числе трехтрассовый) с точки зрения доступности примерно одинаковы и имеют более низкие показатели доступности.

7. По количеству трасс однотрассовый вариант является более предпочтительным для всех типов ОГ. Тем не менее, двухтрассовый вариант достаточно «стабилен» по отношению к вариантам выбора ГДВУ, что дает основание полагать существование оптимального двухтрассового варианта.

8. В целом можно ранжировать типы ОГ следующим образом: на первом месте QZSS(однотрассовый)+M15, далее QZSS, ГСНО, которые обеспечивают улучшение характеристик без учета коррекций и ухудшения качества под воздействием возмущающих факторов. Поэтому именно на них надо обратить особое внимание при формировании методики анализа деградации под воздействием возмущающих факторов различного типа и разработке требований по поддержанию параметров структуры группировок многоцелевых КА, обеспечивающих выполнение функциональных требований.

9. Дополнение ГЛОНАСС представленными в таблицах 1-2 орбитальными группировками гарантирует непрерывность навигационного поля для выбранных региональных потребителей даже при выводе из нее 1-го или даже 2-х НКА.

10. Основными факторами, влияющими на ухудшение параметров доступности, являются эволюция долгот восходящих узлов трасс, эксцентриситета, аргумента широты перигея.

11. Поддержание параметров структуры ОГ, обеспечивающих выполнение функциональных требований к ВКК в части навигационных услуг, может быть осуществлено следующими подходами:

- выбором построения ОГ с учетом индивидуального упреждения номинального значения аргумента широты перигея орбиты каждого НКА;

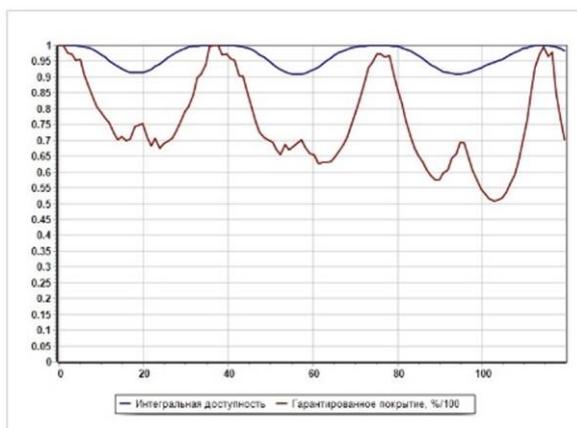
- компенсацией изменения параметров гринвичской долготы восходящего узла и эксцентриситета за счет использования корректирующей двигательной установки.

12. При использовании пассивного метода необходимо учитывать, что

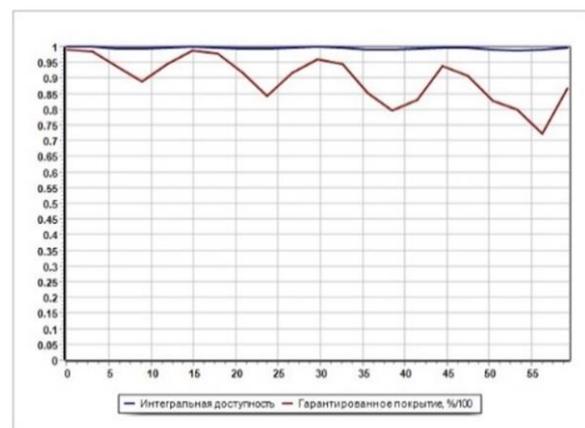
- само по себе формирование упреждения является сугубо индивидуальным для каждого НКА ОГ;
- формирование ОГ с упреждением номинального значения аргумента широты перигея не всегда приводит к увеличению показателей доступности;
- при окончательном выборе ОГ ВКК необходимо дополнительно исследовать вопрос, связанный с подбором индивидуальных исходных данных для каждого НКА ОГ.

13. Использование технологий активной компенсации деградации номинальных структур

- приводит к сглаживанию по времени значений параметров доступности, которые становятся практически постоянными на всем интервале активного существования ОГ НКА и в этом смысле мы имеем стабильную систему с заранее прогнозируемыми характеристиками навигационного поля (см. Рисунок 5);
- в комбинации с выбором начального построения ОГ ВКК позволяет существенно увеличить параметры доступности на всем сроке активного существования ВКК НКА (см. Рисунок 5, б);
- требует затрат характеристической скорости в рамках допустимых значений.

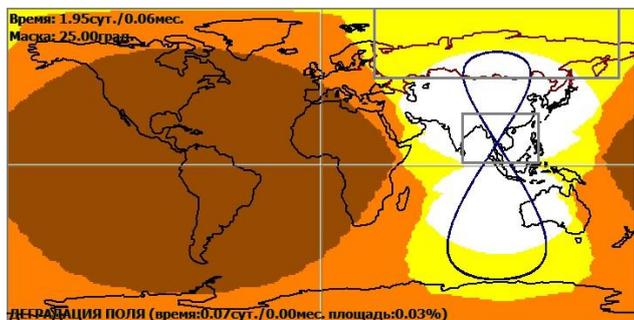


а) без компенсации

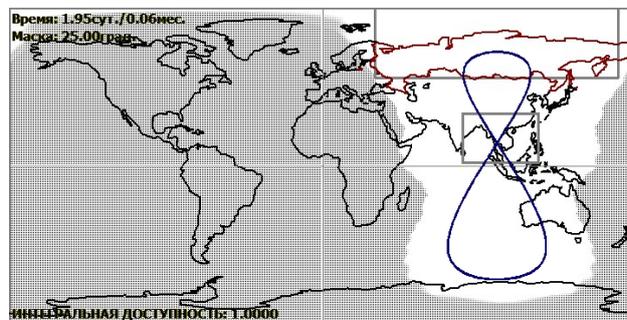


б) с активной компенсацией

Рисунок 5 – Изменение параметров доступности



а) гарантированная доступность



б) интегральная доступность

Рисунок 6 – Параметры доступности ОГ QZSS, однострассовый, вариант с активной компенсацией, угол места 25°

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат настоящего исследования состоит в разработке новых научно обоснованных технических решений и методики решения важной для дальнейшего развития и повышения конкурентоспособности ГЛОНАСС задачи формирования облика дополняющей её орбитальной группировки. Показано, что решение исходной задачи сводится к ряду частных подзадач, результат совместного решения которых позволяет выявить возможные приоритетные построения высокоорбитального космического комплекса.

Для решения упомянутых подзадач получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Предложено рассматривать задачу формирования облика высокоорбитального космического комплекса дополнения орбитальной группировки с точки зрения повышения конкурентоспособности ГЛОНАСС для потребителей БИМТЭК и Российской Федерации.

2. Вектора разнородных показателей эффективности сведен к трем показателям доступности, включающим в себя интегральную и гарантированную доступности, а также улучшение мгновенного геометрического фактора.

3. Предложена методика и этапы решения поставленной задачи, включающая в себя:

- выбор рациональных параметров структуры орбитальной группировки ВКК;
- проведение анализа деградации выбранных номинальных структур группировок НКА под воздействием возмущающих факторов различного типа;
- определение стратегии проведения коррекций орбитальных параметров для обеспечения требований по поддержанию структуры группировок НКА.

4. Предложены единые, взаимосвязанные модели для расчета показателей доступности с учетом различных вариантов орбитальных построений и стратегий управления. Предложены методы компенсации возмущений географической долготы восходящего узла трасс, эксцентриситета, аргумента перицентра. В качестве алгоритма управления долготой восходящего узла предложен алгоритм, основанный на применении достаточных условий оптимальности.

5. Разработана архитектура специализированного программно-математического обеспечения.

Существенную практическую значимость представляют результаты, подтверждающие состоятельность предложенного подхода к решению поставленной задачи, а именно:

1. Обоснована возможность использования ВКК дополнения ГЛОНАСС для существенного повышения параметров доступности навигационных определений как на территории Российской Федерации, так и в странах БИМТЭК.

2. Определена методика построения и архитектура специализированного программно-математического обеспечения для решения поставленной в работе задачи. Созданное на ее основе и реализующее разработанные математические модели программное обеспечение имеет широкие возможности по настройке моделируемой системы, как по составу, так и по характеристикам

3. С использованием специализированного ПМО

- проведено сравнение структур орбитальных группировок ВКК с учетом фактора деградации и сформированы предложения по их применимости в качестве дополнения ГЛОНАСС.
- проведены исследования и сформированы предложения по использованию пассивного метода минимизации деградации орбитальной группировки за счет упреждающего подбора номинальных параметров группировок.
- проведены исследования и сформированы предложения по использованию активного поддержания параметров орбитальных структур.

Основным прикладным результатом работы является то, что в целом, разработанная методика, совокупность математических моделей, а также созданное на их основе программное обеспечение может служить инструментом для обоснования направлений модернизации существующей орбитальной группировки ГЛОНАСС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. *Зай Яр Вин, Морозова Т.А., Старков А.В., Тришин А.А.* Формирование орбитальных параметров навигационных космических аппаратов дополнения ГЛОНАСС // Научно-технический вестник Поволжья №1 2021, с. 22-25

2. *Зай Яр Вин, Старков А.В., Федоров А.В. Тришин А.А.* Компенсация деградации орбитальных параметров космической группировки дополнения ГЛОНАСС // Научно-технический вестник Поволжья №1 2021, с. 26-31

3. *Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин* Анализ и формирование показателей эффективности в задаче распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 28-31

4. *Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин* Результаты экспериментальной отработки математической модели распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 32-36

Публикации в журналах, индексируемых в иностранных библиографических и реферативных базах данных (SCOPUS, Web Of Science):

1. *Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V. T., Starkov A.V.* The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // Advances in the Astronautical Sciences. CA, USA: Univelt Inc., 2020. Vol. 170, p.31-39.

2. *Malyshev V.V., Starkov A.V., Zay Yar Win.* The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of the Reference Orbit // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, Vol. 10, 13-Special Issue, 2018, Pages: 53-58

3. *Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nguyen Viet Hoai Nam, Starkov A.V., Zay Yar Win.* Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // Advances in the Astronautical Sciences. CA, USA: Univelt Inc., 2020. Vol. 170, p.495-503.

В других изданиях:

1. *Зай Яр Вин, Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Анализ вариантов построения орбитальной группировки дополнения ГНСС в интересах региональных потребителей // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 2016 г. С. 108–109.

2. *Зай Яр Вин, Старков А.В.* Определение облика орбитальной группировки и критерии эффективности функционирования ГНСС в интересах региональных

потребителей // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 2017 г. С. 265–266. Vin Z.Ya., Starkov A.V. Determination of the appearance of the complementary orbital grouping of the global navigation satellite system // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018, С. 348-349.

3. *Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V. T., Starkov A.V.* The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // IAA SciTech Forum 2018 November 13 - 15, 2018 Moscow, Russia

4. *Malyshev V. V., Starkov A. V., Fedorov A. V.* Formation Keeping Strategy for a Quasi-Zenith GLONASS Complement // 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS) 30 May-01 June, 2017 Moscow, Russia

5. *Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nguyen Viet Hoai Nam, Starkov A.V., Zay Yar Win.* Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // IAA SciTech Forum 2018 November 13 - 15, 2018 Moscow, Russia