



УДК 629.7

Г. Г. Ступак

ОАО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

С. Г. Ревнивых, Е. И. Игнатович

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ЦНИИмаш, г. Королёв, Россия

В. В. Куршин, В. В. Бетанов

ОАО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

С. С. Панов

4-й центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, г. Юбилейный, Россия

Н. З. Бондарев, В. Е. Чеботарев

ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва», г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия

Н. Н. Балашова, А. И. Сердюков, Л. Н. Синцова

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ЦНИИмаш, г. Королёв, Россия

ВЫБОР СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Проведен анализ характеристик орбитальной группировки системы ГЛОНАСС и тенденций развития зарубежных глобальных навигационных спутниковых систем, выработаны подходы и требования для разработки модернизированной структуры орбитальной группировки. Проанализированы различные варианты модернизации орбитальной группировки ГЛОНАСС, исследована эволюция и методы ее компенсации для рассматриваемых вариантов орбитальных группировок. Разработаны предварительные предложения по структуре орбитальной группировки системы ГЛОНАСС к 2020 году.

Ключевые слова: система ГЛОНАСС, доступность, орбитальная группировка (ОГ), структура ОГ, устойчивость ОГ.

G. G. Stupak

JSC «Russian Space Systems», Moscow, Russia

S. G. Revnivykh, E. I. Ignatovich

Information and Analysis Center for PNT of the Central Research Institute of Machine Building, Korolev, Russia

V. V. Kurshin, V. V. Betanov

JSC «Russian Space Systems», Moscow, Russia

S. S. Panov

4th Central Research Institute of Defense Ministry, Yubileyniy, Russia

N. Z. Bondarev, V. E. Chebotarev*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Russia***N. N. Balashova, A. I. Serdyukov, L. N. Sintsova***Information and Analysis Center for PNT of the Central Research Institute
of Machine Building, Korolev, Russia*

CHOICE OF STRUCTURE OF CONSTELLATION OF THE PROSPECTIVE SYSTEM GLONASS

The presentation gives results of future GLONASS constellation structures trade-off analysis to support accuracy and availability improvement as well as competitiveness of navigation services for user. The evolution and methods of the GLONASS OG compensation were searched for different cases of the OG. Preliminary proposals for the GLONASS orbital group up to 2020 year are offered.

Key words: the GLONASS system, availability, the orbital group (OG), the OG structure, the OG stability.

Высокая актуальность вопроса модернизации ОГ ГЛОНАСС определяется необходимостью обеспечения на конкурентоспособном уровне характеристик точности, доступности и устойчивости радионавигационного поля (РНП), создаваемого глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС) ГЛОНАСС, и существенным вкладом в эти характеристики структуры ОГ.

Исследования направлений модернизации орбитальной группировки системы ГЛОНАСС необходимо проводить с учетом прогнозных характеристик зарубежных навигационных спутниковых систем, которые в последнее время интенсивно развиваются. На настоящий момент полностью функционируют две глобальные навигационные спутниковые системы: ГЛОНАСС и GPS, 27 декабря 2012 года введена в коммерческую эксплуатацию китайская система Compass, в составе которой уже находится по 5 КА на СВО и ГСНО и 6 КА на ГСО, запущены первые четыре навигационных спутника системы Galileo. В результате как минимум к 2020 году будут функционировать четыре полностью развернутые среднеорбитальные глобальные (ГНСС) и две региональные навигационные спутниковые системы (РНСС) с общим количеством нави-

гационных спутников более 130 и общим числом навигационных сигналов около 35, из которых около 25 будут доступны гражданскому потребителю.

Такая ситуация определяет необходимость для системы ГЛОНАСС, с одной стороны, решать задачу по выдерживанию жесткой конкуренции с другими ГНСС в части навигационного обеспечения различных потребителей, а с другой – задачу по интеграции с ними на уровне потребительской аппаратуры.

Эффективное решение обеих задач обеспечивает на высоком уровне навигационную независимость, безопасность страны и координатно-временное обеспечение с использованием ГЛОНАСС во всем мире для широкого круга потребителей. Для решения и первой и второй задачи отечественная система должна иметь тактико-технические характеристики (ТТХ) по точности, доступности и устойчивости РНП как минимум на одном уровне с GPS, причем достигнуть их необходимо в самое ближайшее время, иначе «навигационную нишу» ГЛОНАСС займут другие быстро развивающиеся навигационные системы.

Для обеспечения конкурентоспособных ТТХ ГЛОНАСС новая архитектура системы и ее составные части к 2020 году и в дальнейшей перспективе должны сбалансированно развиваться на высоком конкурентоспособном уровне с учетом перспективных требований потребителей и мировых тенденций

© Ступак Г. Г., Ревнивых С. Г., Игнатович Е. И., Куршин В. В., Бетанов В. В., Панов С. С., Бондарев Н. З., Чеботарев В. Е., Балашова Н. Н., Сердюков А. И., Синцова Л. Н., 2013

в развитии технологий спутниковой навигации. В связи с этим должны быть разработаны составные части системы ГЛОНАСС на новом конкурентоспособном научно-техническом уровне, в том числе – и модернизированная орбитальная группировка системы с увеличенным составом КА на средневысотных орбитах, способствующая повышению доступности, точности и устойчивости навигации потребителей системы ГЛОНАСС.

С целью обоснованного выбора модернизированной структуры ОГ важным направлением исследований является анализ достоинств и недостатков существующей структуры ОГ ГЛОНАСС.

Орбитальное построение существующей ГНСС ГЛОНАСС основано на трех равнонаклонных к экватору плоскостях и равномерном размещении по 8 спутников в каждой плоскости со сдвигом расположения спутников в соседних плоскостях на 15° . Отношение периода орбиты КА ГЛОНАСС к звездным суткам равно 8:17. Такое построение ОГ ГЛОНАСС обеспечивает изотрасность (единую трассу для всех КА) номинальной ОГ, что уменьшает деградацию структуры ОГ за счет аномалий гравитационного поля Земли, обеспечивая их воздействие на все КА ОГ интегрально как практически одинаковое. Поэтому изотрасность ОГ обеспечивает естественную устойчивость ее параметров, что в достаточной мере сокращает требуемые затраты топлива на КА и упрощает и удешевляет управление орбитальным положением КА ГЛОНАСС.

Однако, с другой стороны, регулярное геометрическое построение ОГ и соответствующая ему повторяемость характеристик РНП могут приводить к появлению в определенных интервалах времени на поверхности Земли устойчивых зон ухудшения точности навигации (так называемых зон «ненаблюдаемости») ГНСС для потребителя.

Полное вырождение решения навигационной задачи по одномоментным измерениям происходит тогда и только тогда, когда все используемые навигационные КА лежат на поверхности кругового конуса с вершиной в точке положения потребителя. При этом ранг матрицы $F = (WW^T)$ вторых моментов ошибок определения параметров позиционирования по результатам измерений псевдодальностей в этом случае равен 3. Для реальных ОГ ГНСС такие ситуации могут возникать не в чистом виде, а с небольшими отклонениями,

при которых имеет место не вырожденность (потеря «наблюдаемости»), а существенное ухудшение точности навигации.

Основные результаты исследований зон ухудшения точности навигационных определений по системе ГЛОНАСС следующее.

1. Навигационному полю ГНСС ГЛОНАСС при существующей номинальной ОГ присуще наличие зон ухудшения качества навигации (увеличение геометрических факторов VDOP и PDOP в 20–100 раз) потребителей, расположенных в интервале широт: $\varphi \approx \pm (25-28^\circ)$.
2. Продолжительность зон для ограниченной видимости по углу места 5° достигает 10 минут с максимальными размерами: 5° по долготе и 3° по широте; в центральных точках зон PDOP равна 50, а локальная точная доступность навигации (по условию PDOP < 6) составляет 0,983.
3. Выход из строя одного, двух и более спутников, увеличение ограничивающего угла места могут привести к существенному увеличению размеров и продолжительности зон ухудшения навигации, увеличению вертикального геометрического фактора и снижению локальной доступности в этих зонах.

Кроме того, недостаточный состав ОГ ГЛОНАСС и меньшая, чем у других ГНСС, высота орбит приводят в целом к ухудшенным характеристикам ГЛОНАСС по сравнению с характеристиками зарубежных ГНСС, за исключением приполярных областей земной поверхности. Итак, можно сделать следующие выводы относительно характеристик РНП ГЛОНАСС за счет структуры ОГ:

- в широтных поясах выше $\pm 45^\circ$ точность/доступность навигации за счет ОГ по системе ГЛОНАСС сопоставима с точностью/доступностью системы GPS и Galileo, а в приполярных районах у системы ГЛОНАСС они даже лучше;
- внутри широтного пояса $\pm 45^\circ$ точность/доступность системы ГЛОНАСС уступает системам GPS и Galileo, при этом у ГЛОНАСС имеются зоны существенного временного ухудшения точностных характеристик, которые практически отсутствуют у GPS и Galileo;
- в среднем по территории Земли потенциальная точность системы ГЛОНАСС за счет геометрического фактора (PDOP) на 12...20 % уступает ее уровню для финальных версий ОГ зарубежных ГНСС;

- при больших углах затенения ($\sim 25^\circ$), соответствующих городским и горным условиям, система ГЛОНАСС в 1,5–1,7 раза уступает по глобальной доступности другим ГНСС.

В связи со сказанным для доведения доступности и геометрического фактора системы ГЛОНАСС до конкурентоспособного уровня с зарубежными ГНСС необходима модернизация ее орбитальной группировки, которая заключается в увеличении состава ОГ и выбора ее структуры.

На основе анализа состояния существующей ОГ ГЛОНАСС и планов развития системы в рамках ФЦП, принципиально возможных вариантов модернизации ОГ и перспектив развития зарубежных ГНСС можно определить основные требования к модернизации ОГ ГЛОНАСС, реализация которых должна обеспечивать эффективность развития системы и которые состоят в следующем.

1. Обеспечение выполнения показателей ФЦП в период 2012–2025 годов по составу орбитальной группировки, характеристикам точности и доступности навигации.
2. Обеспечение конкурентоспособного уровня системы ГЛОНАСС по характеристикам точности, доступности и устойчивости навигации, способствованию повышению уровня взаимодополняемости ГЛОНАСС с зарубежными ГНСС.
3. Повышение уровня характеристик РНП ГЛОНАСС для навигационной аппаратуры, функционирующей по 24 КА, за счет эффективного использования дополнительных КА в целях оперативной замены выходящих из строя штатных КА ГЛОНАСС.
4. Построение модернизированной ОГ ГЛОНАСС с учетом планов и ресурсов системы ГЛОНАСС в части реализации запусков новых аппаратов и перспективных возможностей составных частей системы ГЛОНАСС, в том числе НКУ, МСЛ, навигационного кадра, состава частотных литеров (для его минимизации необходимо антиподное расположение КА).
5. Обеспечение возможности проведения летных испытаний КА новых поколений (11Л-12Л, 13Л-14Л), эффективности функционирования систем, базирующихся на КА штатной системы ГЛОНАСС (БИНК, МСЛ, КОСПАР-САРСАТ и др.).
6. Возможная минимизация рисков при создании модернизированной ОГ и финансо-

вых и временных затрат на проведение модернизации.

7. Обеспечение высокого уровня характеристик РНП ГЛОНАСС в период перехода к модернизированной ОГ.
8. Открытость структуры ОГ к ее совершенствованию после 2020 года с учетом дальнейшего развития системы.

Принципиально модернизация ОГ возможна на основе трех подходов (и их сочетаний): реконструкции штатной ОГ (например, поднятие высоты орбиты); добавления к штатной ОГ дополнительных орбитальных сегментов; создания новой ОГ на дополнительных плоскостях параллельно с существующей.

В целях достижения конкурентоспособных характеристик системой ГЛОНАСС принципиально может быть рассмотрено достаточно большое число вариантов возможных рациональных структур построения орбитальной группировки системы, способствующей обеспечению конкурентоспособного уровня ГЛОНАСС. Поэтому в процессе проводимых ранее исследований направленных развития ОГ ГЛОГАСС, в частности авторами данной статьи, рассматривался очень широкий круг перспективных орбитальных группировок. В том числе исследовались варианты существенной модернизации орбитальных параметров штатной ОГ ГЛОНАСС. Например, изотрассная орбитальная группировка из 30 КА, полученная из существующей путем поднятия высоты орбит КА на 200 км с последующим добавлением 6 КА, будет обладать характеристиками РНП на уровне ОГ GPS и Galileo. Отметим, что подобная орбитальная группировка может быть создана и без коррекции параметров орбиты функционирующих КА ГЛОНАСС путем ее формирования в дополнительных плоскостях, расположенных между штатными плоскостями системы ГЛОНАСС, но для этого нужна определенная коррекция программы выведения новых КА.

Перечисленные выше требования к модернизации ОГ и существующие ограничения, в том числе минимизация динамических операций при создании модернизированной ОГ; располагаемые планы и ресурсы системы ГЛОНАСС в части реализации запусков новых аппаратов и перспективных возможностей составных частей системы ГЛОНАСС; необходимость оптимизации переходного периода к модернизированной ОГ, не позволяют рассматривать многие варианты ОГ в качестве кан-

дидатов при выборе облика перспективной ОГ ГЛОНАСС.

Поэтому основные параметры (величины больших полуосей, наклонений) орбит в модернизированной навигационной системе целесообразно оставить такими же, какие используются в системе ГЛОНАСС в настоящее время. С учетом вышесказанного наиболее целесообразно на данном этапе сохранить существующую структуру ОГ (ГЛОНАСС-24) как базовую, её наращивать за счет дополнительных орбитальных сегментов с предпочтительным сохранением орбитального периода и изотрасности модернизированной ОГ в целом.

Таким образом, первоначально достаточно большое количество вариантов возможных структур построения орбитальной группировки системы ГЛОНАСС с новыми возможностями существенно снижается. Дополнительно необходимо отметить, что модернизация ОГ должна проводиться без революционных скачков, способных свести на нет как достижение целей модернизации, так и полноценное использование системы. С учетом вышесказанного на окончательном этапе исследований были рассмотрены следующие варианты перспективной ОГ ГЛОНАСС на основе 30 КА:

- ОГ-30А – 6-плоскостная ОГ на базе ОГ ГЛОНАСС-24 с 3 дополнительными плоскостями, в которых размещено по 2 КА;
- ОГ-30Б – 3-плоскостная ОГ на базе ГЛОНАСС-24, где в каждую плоскость добавлено по 2 антиподных КА;
- ОГ-30 (6плх5) – 6-плоскостная ОГ из 30 КА по 5 равномерно распределенных КА в каждой плоскости без изменения высоты орбиты;
- ОГ-30 – 3-плоскостная ОГ из 30 КА по 10 равномерно распределенных КА в каждой плоскости без изменения высоты орбиты.

Отметим, что в качестве перечисленных типов ОГ выбраны оптимальные их варианты из множества вариантов, отличающихся друг от друга различным групповым расположением КА вдоль орбиты.

Последние два варианта требуют для своей реализации приложения корректирующих импульсов, однако они сохраняют период орбиты и поэтому характеристики перехода к модернизированной ОГ для этих вариантов имеют более устойчивый характер, чем при изменении периода ОГ, хотя определенных

рисков при проведении динамических операций это не снимает. Риски определяются тем, что ненормальное срабатывание ДУ даже для одного КА приводит к ОГ с ухудшенными и непостоянными характеристиками РНП, а необходимость сдвига штатных слотов – к определенному ухудшению характеристик РНП в процессе модернизации. Кроме того, последние два варианта из перечисленных ОГ могут служить определенным эталоном при оценке вариантов ОГ-30А и ОГ-30Б.

Для всех перечисленных ОГ были сделаны оценки навигационных характеристик и проведено сравнение по показателям точности (в части геометрического фактора PDOP) и доступности системы ГЛОНАСС, используемым в рамках ФЦП «ГЛОНАСС-2020». Последние два критерия отражают доступность навигации при обеспечении повышенной точности навигации и навигации при больших углах затенения, поэтому их логично включить в показатели ФЦП, что и было на первом этапе их формирования.

Результаты сравнения этих характеристик для различных номинальных ОГ из 30 КА (оптимальных их вариантов) с характеристиками штатной ОГ ГЛОНАСС-24 приведены в табл. 1.

Как видим, наилучшие характеристики имеют трехплоскостная и шестиплоскостная ОГ с равномерным распределением КА вдоль орбиты. Однако их характеристики (особенно в части геометрического фактора – 3...4 %) различаются не настолько значительно, чтобы отдавать преимущество орбитальным группировкам, требующим «динамики» при их построении, в отличие от орбитальных группировок (ОГ-30А, ОГ-30Б), полностью основанных на штатной ОГ ГЛОНАСС. Кроме того, для этих двух вариантов ОГ с равномерным распределением КА нарушается изотрасность, что, в свою очередь, снижает динамическую устойчивость ОГ.

При этом шестиплоскостная ОГ (ОГ-30А) имеет определенные преимущества по характеристикам РНП перед трехплоскостной (ОГ-30Б) для малых граничных углов места навигации потребителей, но уступает для больших углов. Кроме того, шестиплоскостная ОГ в отличие от трехплоскостной может быть реализована как изотрасная с указанными выше преимуществами, в том числе и при дальнейшем развитии ОГ с числом КА более 30. С учетом указанных выше достоинств

Таблица 1

Навигационные характеристики для ОГ ГЛОНАСС-24 и ОГ из 30 КА

	ГЛОН-24 М/Р	ОГ-30 М/Р	ОГ-30А М/Р	ОГ-30Б М/Р	ОГ-30 (6плх5) М/Р
Доступность по условию PDOP ≤ 6 на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,999911	1/1	1/1	1/1	1/1
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,94/ 1,74	1,66/ 1,51	1,67/ 1,54	1,72/ 1,56	1,61/ 1,55
Доступность повышенной точности по условию PDOP ≤ 2 на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,614/ 0,842	0,912/ 0,991	0,875/ 0,978	0,836/ 0,983	0,935/ 0,972
Доступность по условию PDOP ≤ 6 в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°	0,492/ 0,786	0,876/ 0,970	0,703/ 0,902	0,730/ 0,930	0,771/ 963

8

ОГ-30А далее проанализируем варианты ее реализации. Как уже было сказано, результаты сравнения различных ОГ приведены для оптимальных их вариантов. Оптимальному варианту для шестиплоскостной ОГ из 30 КА соответствует сочетание штатной ОГ ГЛОНАСС и по 2 КА в каждой дополнительной плоскости, располагаемых в определенных слотах. Однако формировать и поддерживать жесткую структуру ОГ-30А (впрочем, как и ОГ-30Б) практически невозможно из-за располагаемой схемы выведения КА, в составе которой предусмотрено большое число РН «Протон», запускающих по 3 КА «Глонасс».

Поэтому необходимо оценить характеристики для различных вариантов шестиплоскостной ОГ из 30 КА. Структура этих подвариантов ОГ-30А определяется как сочетание штатной ОГ ГЛОНАСС и 6 КА, расположенных как антиподные в 3 дополнительных плоскостях различным способом. Эти 6 КА могут располагаться по дополнительным плоскостям в следующих сочетаниях: (2, 2, 2), (4, 2, 0), (0, 2, 4), (6, 0, 0). Базовой основой для построения рассматриваемых вариантов ОГ служит 6-плоскостная изотрассная ОГ из 48 КА, практически представляющая собой удвоенный вариант штатной ОГ ГЛОНАСС.

Отметим, что расположение при 30 КА в ОГ в дополнительных плоскостях неантиподных КА нецелесообразно при требовании максимизации числа КА, излучающих сигналы с частотным разделением (ЧР), поскольку такое расположение не позволит функционировать на всех 6 дополнительных КА сигналов с частотным разделением при общем числе КА, равном 30.

Как было сказано выше, одной из задач, решаемых модернизированной ОГ, явля-

ется повышение уровня характеристик РНП ГЛОНАСС для существующей навигационной аппаратуры, функционирующей по 24 КА, за счет эффективного использования дополнительных КА в целях замены (резервирования) выходящих из строя штатных КА ГЛОНАСС. В ближайший период состояния системы целесообразны три варианта резервирования для НАП, функционирующей по 24 КА:

- вариант, при котором в каждой плоскости ОГ ГЛОНАСС 1-2 активных резервных КА устанавливаются в ближайшей окрестности космических аппаратов, которые согласно прогнозу САС должны наиболее быстро прекратить свое целевое функционирование. В этом случае после отключения этих штатных КА согласно прогнозу САС характеристики РНП будут соответствовать характеристикам ОГ ГЛОНАСС-24 (через промежуток времени, затрачиваемый на закладку нового альманаха при условии проведения по резервным КА регулярного эфемеридно-временного обеспечения). К проблемам реализации этого варианта относятся два фактора: необходимость точного знания прогноза САС КА (выход из строя КА не в соответствии с прогнозом ухудшает характеристики РНП для существующей НАП) и пониженные (по сравнению с нижеуказанным вариантом) характеристики РНП для НАП нового типа, функционирующей по всем КА ОГ;
- вариант, при котором для замены выбывших из функционирования штатных КА предусмотрены дополнительные 6 КА в составе модернизированной ОГ;
- вариант, при котором в каждой плоскости устанавливается несколько КА, например по 2 полярно расположенных КА, без уче-

та САС (случайным образом); такой вариант неэффективен для НАП, функционирующей как по 24, так и по 30 КА с точки зрения параметров РНП.

Реализация второго варианта как раз и является одной из двух основных задач, решаемых модернизированной ОГ ГЛОНАСС. Первой является обеспечение функционирования НАП по расширенной ОГ при условии модернизации элементов космического сегмента и навигационной аппаратуры. Решение второй задачи осуществляется параллельно с первой, и ее назначением является функционирование НАП существующего типа на основе практически постоянного поддержания для этой НАП ОГ в составе 24 КА. Суть этого заключается в том, что при выходе из строя от 1 до 6 навигационных КА «старой ОГ» такое же число «новых» КА переводится в режим передачи сигналов и информации в навигационном кадре. То есть количество КА, доступных существующей НАП, остается равным 24. При этом, разумеется, условия навигации незначительно ухудшаются из-за изменения общей конфигурации ОГ из 24 КА. Степень такого ухудшения для ОГ-30А или ОГ-30Б при выбывании 1-2 КА, как будет показано чуть ниже, вполне удовлетворительная.

Моделирование процесса резервирования проводилось следующим образом: космические аппараты в количестве «К» случайным образом исключаются из штатной ОГ, и столько же КА включаются в ЦН из 6 дополнительных КА. Выборки реализуются случайным образом на основе равномерного распределения. Имитационное моделирование позволяет найти наилучшие, наихудшие и средние

характеристики РНП при включении резерва из ОГ 30А и 30Б. Число вариантов перебора было выбрано на основе проведенных оценок равным 100...200 в зависимости от значений «К». При этом штатные и дополнительные КА выбираются случайным образом.

Параметры РНП при замещении штатных КА, выбывших из целевого назначения (ЦН), дополнительными КА представлены на рис. 1, 2.

Выводы по резервированию штатной ОГ ГЛОНАСС на основе дополнительных 6 КА в структуре ОГ следующие.

1. При выбывании от 1 до 6 штатных КА из ОГ и замещении их дополнительными КА из ОГ 30А и 30Б параметры РНП в основном ухудшаются с увеличением числа замещаемых КА.
2. Имеет место более высокая эффективность такого метода резервирования по сравнению с орбитальным резервированием, когда в каждой плоскости находятся по 2 антиподных КА, расположенных случайным образом.
3. Вариант, при котором в каждой плоскости ОГ по 2 КА устанавливаются в горячем резерве в ближайшей окрестности космических аппаратов, которые согласно прогнозу САС должны наиболее быстро прекратить свое целевое функционирование, может оказаться более эффективным, чем рассматриваемые, так как для него после выбывания штатного КА характеристики РНП будут соответствовать ОГ ГЛОНАСС-24 при соответствии прогноза САС процессу выбывания. Однако этот вариант будет существенно уступать по характеристикам

Вероятность PDOP < 6 при замене заданного количества КА штатной ОГ из 24 КА аппаратами из ОГ, расположенной в 3 дополнительных плоскостях (30А) при 5 град.

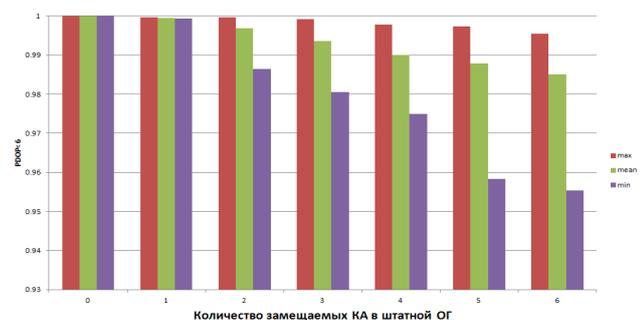


Рис. 1. Доступность PDOP < 6 для ОГ-30А при формировании ОГ из 24 КА с учетом дополнительных КА (угол места 5°)

Вероятность PDOP < 6 при замене заданного количества КА штатной ОГ из 24 КА аппаратами из дополнительных 6 рабочих точек, расположенных по 2 точки в каждой плоскости в антиподных позициях (30В), гамма = 5 град.

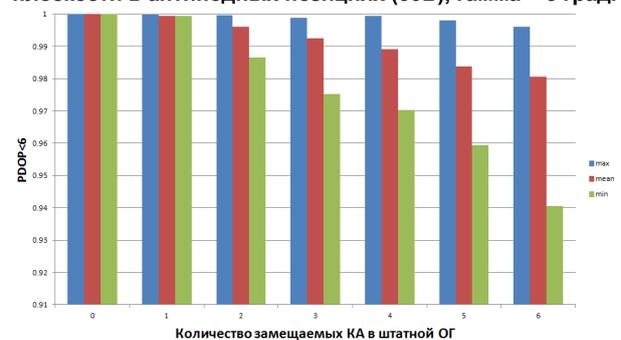


Рис. 2. Доступность PDOP < 6 для ОГ-30Б при формировании ОГ из 24 КА с учетом дополнительных КА (угол места 5°)

ОГ из 30 КА, что особенно важно для перспективной НАП, функционирующей по 30 КА и более.

Оба варианта ОГ (30А и 30Б) обеспечивают практически 100 %-ю (в среднем 99,5 %) доступность навигации при выбывании 2 КА из штатной ОГ и их замене дополнительными КА. Сравнение ОГ-30А и ОГ-30Б, как основы для резервирования при ограничениях на работу с НАП только 24 аппаратами, показывает небольшое преимущество ОГ-30А.

Одним из основных требований к модернизированной ОГ является устойчивость параметров ОГ и, как следствие, отсутствие необходимости проведения корректирующих импульсов, что существенно упростит процесс управления КА ГЛОНАСС, а значит, снизит нагрузку на НКУ и упростит конструкцию КА. Ниже приводятся оценки эволюции ОГ ГЛОНАСС для вариантов ОГ-30, ОГ-30А, ОГ-30Б.

Нарушение устойчивости ОГ определяется следующими факторами: изменением относительного положения КА в одной орбитальной плоскости; фазовым расхождением КА из различных плоскостей (групповые сдвиги КА в плоскостях); изменением ориентации каждой плоскости относительно других за счет изменения наклонов и относительных значений прямого восхождения восходящего узла.

Деградация ОГ происходит под воздействием притяжения Земли, Солнца, Луны, солнечного давления и ошибок выведения спутника в рабочую точку. При этом возмущающие силы действуют на КА ОГ различным образом в зависимости от начальных условий, а именно:

- возмущения орбит КА от гравитационного поля Земли зависят от географической долготы восходящего узла и приводят к изменению расстояний между КА внутри плоскостей;
- возмущения орбит КА от гравитационных полей Луны и Солнца зависят от прямого восхождения восходящего узла орбит и приводят к изменению наклонов, разностей между прямыми восхождениями восходящих узлов орбит КА из разных плоскостей и к фазированию КА из разных плоскостей по аргументу широты. При этом сдвиг КА вдоль орбиты по аргументу широты дополнительно зависит от началь-

ной даты и одинаков для всех КА одной плоскости.

Для орбит КА типа ГЛОНАСС-24 изменение внутривосходящего расстояния между двумя КА по аргументу широты u имеет характер, близкий к линейному, и за 10 лет полета не превышает: для ОГ ГЛОНАСС-24 и ОГ-30А – $1...2^\circ$ относительно номинального значения 45° (в этом случае сказывается изотрасность ОГ); для ОГ-30 (ОГ с равномерным распределением КА) – $2...4^\circ$ относительно номинального значения 36° (в 2 раза больше предыдущих значений из-за отсутствия изотрасности); для ОГ-30Б – $5...6^\circ$ относительно расстояния в $22,5^\circ$ между «антиподным» и соседними КА, что в $3...5$ раз выше эволюции для номинальных КА, равной $1...2^\circ$.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что все перечисленные орбитальные группировки с номинальными параметрами КА ГЛОНАСС достаточно устойчивы к эволюции структуры ОГ в течение $5...10$ лет. Изменения этих характеристик не превышают $5...6\%$. Более того, часть уходов орбитальных параметров от номинальных значений могут быть скомпенсированы путем специального подбора начальных условий при установке навигационного КА в рабочую точку.

Предложения по совершенствованию структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС на период 2016–2020 годов.

1. Исходя из тенденций развития ГНСС и различных вариантов модернизации ОГ ГЛОНАСС следует, что в целях обеспечения показателей ФЦП и конкурентоспособности системы необходимо увеличение до 2020 года численного состава ОГ системы ГЛОНАСС до 30 КА и более. Для обеспечения практически стопроцентного уровня навигации на территории РФ, включая навигацию в горных условиях и мегаполисах (при угле места $> 25^\circ$), и конкурентоспособного уровня навигации на территории всей Земли целесообразно доведение численного состава ОГ после 2020 года до 33–36 КА либо создание дополнительного орбитального сегмента на геосинхронных орбитах.
2. Существенное влияние на характеристики РНП кроме состава КА оказывает структура ОГ. Проведенный анализ вариантов модернизации ОГ системы ГЛОНАСС, связанных с доведением числа КА до 30, показал, что в существующих условиях с точки

зрения характеристик РНП лучшим вариантом является переход на трехплоскостную изотрассную ОГ (по 10 равномерно расположенных в орбитальной плоскости навигационных аппаратов с повышением высоты на 200 км). Однако переход к такой ОГ связан с существенными техническими рисками, так как требует перемещения всех КА и повышения высоты их орбит либо модернизации программы запусков КА. Похожая ситуация имеет место и для вариантов трехплоскостной и шестиплоскостной ОГ с равномерно распределенными по плоскостям КА, имеющими основные параметры (высота, наклонение), как у штатной ОГ ГЛОНАСС, и отсутствие изотрассности.

3. Рассмотренные варианты орбитальных группировок ОГ-30А или ОГ-30Б, немного уступая указанным вариантам по навигационным характеристикам, используют в качестве основы штатную ОГ ГЛОНАСС и удовлетворяют основным требованиям к модернизации ОГ ГЛОНАСС. При этом более предпочтительным является вариант (ОГ-30А) перехода к шестиплоскостной ОГ, который обеспечит следующие возможности:

- обеспечение устойчивости РНП при использовании существующей НАП (функционирующей по 24 КА ГЛОНАСС) на основе стратегии оперативного переключения режимов функционирования части дополнительных КА в случае выхода из строя до 6 КА штатной ОГ из 24 КА;
- конкурентоспособный уровень навигации для перспективной НАП, функционирующей по расширенной ОГ из 30 КА;
- изотрассность орбит и, как следствие, более высокая по сравнению с неизотрассными вариантами устойчивость орбитальных параметров и параметров РНП на протяжении всего САС без использования корректирующих импульсов;
- открытость ОГ данного типа к дальнейшему (более 30 КА) эффективному развитию ОГ, пределом которого является достижение состава из 48 КА в виде удвоенной существующей ОГ ГЛОНАСС.

Для обеспечения функционирования перспективной орбитальной группировки в составе 30 и возможно более КА необходимо обеспечить решение вопросов по модернизации других элементов системы ГЛОНАСС, в том числе:

- модернизировать навигационный кадр в диапазоне L1 сигналов с частотным разделением для передачи в составе альманаха данных о не менее чем 30 КА, которые к 2020 году будут входить в систему ГЛОНАСС;
- разработать новые навигационные кадры для сигналов с кодовым разделением, практически не имеющие ограничения на число КА в орбитальной группировке, а также позволяющие снизить методическую погрешность расчета эфемеридно-временной информации (как следствие, расчета псевдодальности) до уровня единиц сантиметров;
- модернизировать наземный комплекс управления с целью управления и эфемеридно-временного обеспечения всех КА расширенной орбитальной группировки;
- модернизировать БАМИ и бортовой комплекс управления в части модернизации циклограммы взаимодействия КА, повышения частоты (до 1 часа) перезакладки альманахов, необходимой для оперативной замены выбывших КА резервными из состава дополнительных КА модернизированной ОГ ГЛОНАСС;
- осуществить регистрацию в МСЭ (международная служба электросвязи) дополнительных литер, обеспечивающих функционирование ОГ в составе 30 КА, введение дополнений в «Интерфейсный контрольный документ ...» и «Концепцию развития навигационных сигналов ...».

Библиографические ссылки

1. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ, редакция 5.1. Москва, 2007.
2. Концепция федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012–2020 годы, проект, 6 июня 2011 г.
3. НИР «Комплекс-ЦН», ФГУП ЦНИИмаш. 2011 г.
4. Назаренко А. И., Скребушевский Б. С. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. М. : Машиностроение, 1981.
5. Ревнивых С.Г. Спутниковые системы, Тенденции развития глобальной спутниковой навигации : доклад на 19-й международной конференции по интегрированным навигационным системам в ЦНИИ Электроприбор. Санкт-Петербург, май 2012.
6. GPS World Magazine, 01/2007-04/2012.

Статья поступила в редакцию
29.05.2013 г.