

2. Урличич Ю. М., Меньшиков В. А., Перминов А. Н. Глобальные проблемы человечества и космос : монография. М. : МАКД., 2010. 570 с.

3. Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. 2009–2010 // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий : тр. II Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения М. С. Рязанского. 2–4 июня 2009 г. / под ред. Ю. М. Урличича, А. А. Романова. М. : Радиотехника, 2010. 272 с.

4. Ступак Г. Г., Шмудевич М. М. ГЛОНАСС – непрерывно развивающаяся система // VI конф. по уязвимости ГНСС и возможным решениям : тез. доклада. г. Башка, Хорватия. 2012.

5. Ревнивых С. Г. ГЛОНАСС : достижения, перспективы и проблемы развития. // Мир измерений. 2012. № 4 (134). С. 4–11.

References

1. Stupak G. G. *Trudy 17 Mezhdunar. nauch. konf. "Sistemnyy analiz, upravleniye i navigatsiya"* (Proceedings of the "The System Analysis, Management, and Navigation" 17-th International Science Conference). Yevpatoria, Crimea. 1–8 July 2012, p. 11–14.

2. Urlichich Y. M., Menshikov V. A., Perminov A. N. *Globalnyye problemy chelovechestva i kosmos* (The mankind global problem and the outer space). Monograph. Moscow, MAKD, 2010, 570 p.

3. *Trudy II Vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya M. S. Ryazanskogo "Aktual'nyye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy"* (Proceedings of the "Actual problems of the Space-Rocket Instrument Engineering and Information Technologies" II All-Russian Science and Research Conference devoted to the 100-year anniversary of M.S. Ryasansky), 2–4 June 2009, under the editorship of Urlichich Y. M., Romanov A. A. Moscow : Radiotechnocs, 2010. 272 pp.

4. Stupak G. G., Shmulevitch M. M. The GLONASS as the continuously developing system [GLONASS – nepreryvno razvivayushchayasya sistema]. *6 konf. po uyazvimosti GNSS i vozmozhnym resheniyam : tez. Doklada* (6-th Conference devoted to GNSS vulnerability and possible decisions). Theses of Mr. Bashka, Croatia. 2012.

5. Revnivykh S. G. *Mir izmereniy*. 2012, no. 4 (134), pp. 4–11.

© Данилюк А. Ю., Ревнивых С. Г., Тестоедов Н. А., Ступак Г. Г., Урличич Ю. М., 2013

УДК 629.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ГНСС ГЛОНАСС ДО 2020 ГОДА И ДАЛЕЕ С УЧЕТОМ ДОВЕДЕНИЯ ЕЕ СОСТАВА К 2020 ГОДУ ДО 30 КА

Г. Г. Ступак¹, С. Г. Ревнивых², Е. И. Игнатович², В. В. Куршин¹, В. В. Бетанов¹, С. С. Панов³,
Н. З. Бондарев⁴, В. Е. Чеботарев⁴, Н. Н. Балашова², А. И. Сердюков², Л. Н. Синцова²

¹ ОАО «Российские космические системы»

Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53

² Информационно-аналитический центр координатно-временного

и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш)

Россия, 141070, Московская область, Королев, ул. Пионерская, 4

E-mail: evgeniy.ignatovich@glonass-iac.ru

³ ФБУ 4 ЦНИИ Министерства обороны России

Россия, 111091, Московская область, Юбилейный, ул. Тихонравова, д. 29

⁴ ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Проведен анализ характеристик существующей 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 г.

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

RESEARCH OF ALTERNATIVE METHODS OF IMPROVEMENT OF STRUCTURE OF ORBITAL GROUP OF GLONASS SYSTEM TILL 2020 AND FURTHER

G. G. Stupak¹, S. G. Revnivikh², E. I. Ignatovich², V. V. Kurshin¹, V. V. Betanov¹, S. S. Panov³,
N. Z. Bondarev⁴, V. E. Chebotarev⁴, N. N. Balashova², A. I. Serdyukov², L. N. Sintsova²

¹JSC «Russian Space Systems»

53 Aviamotornaya str., 111250, Moscow, Russia

²Information and Analysis Center for PNT of the Central Research Institute of Machine Building
4 Pionerskaya str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia. E-mail: evgeniy.ignatovich@glonass-iac.ru

³4th Central Research Institute of Defense Ministry,

Russia, 111091, Moscow region, Yubileyny, Tikhonravova Street, 29

⁴JSC «Academician M. F. Reshetnev « Information Satellite Systems»

52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

The authors present the analysis of characteristic features of the existing orbital group of the GLONASS system and foreign global navigation satellite systems development trends, along with the elaborated approaches and standards for the development of the update structure of an orbit group. Different variants of the GLONASS orbital group update are analyzed, evolution and methods of the GLONASS orbital group compensation are investigated for the analyzed variants of the orbit group. Preliminary proposals for the GLONASS orbit group structure of the year 2020 are worked out.

Keywords: the GLONASS system, availability, orbital group (OG), OG structure, 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 г. 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 г. будут функционировать четыре полностью развернутые среднеорбитальные глобальные (ГНСС) и две региональные навигационные спутниковые системы (РНСС) с общим количеством навигационных спутников более 130 и общим числом навигационных сигналов порядка 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

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 [1].

Для обеспечения конкурентоспособных ГТХ ГЛОНАСС новая архитектура системы и ее составные части к 2020 г. и в дальнейшей перспективе должны сбалансировано развиваться на высоком конкурентоспособном уровне с учетом перспективных требований потребителей и мировых тенденций 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 равномерным размещением по 8 спутников в каждой плоскости со сдвигом расположения спутников в соседних плоскостях на 15°. Отношение периода орбиты КА ГЛОНАСС к звездным

суткам равно $\frac{8}{17}$. 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 [2; 3].

Однако с другой стороны регулярное геометрическое построение ОГ и соответствующая ему повторяемость характеристик РНП может приводить к появлению в определенные интервалы 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 состоят в следующем.

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: $\varphi \approx \pm(25\text{--}28^\circ)$.

2. Продолжительность зон для ограничений видимости по углу места 5° достигает 10 минут с максимальными размерами: 5° по долготе и 3° по широте; в центральных точках зон величина PDOP равна 50, а локальная суточная 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 этого, недостаточный состав ОГ ГЛОНАСС и меньшая чем у других ГНСС высота орбит приводит в целом к ухудшенным характеристикам ГЛОНАСС по сравнению с характеристиками зарубежных ГНСС за исключением приполярных областей земной поверхности. Резюмируя сказанное 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 харак-

теристик, 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 с вышесказанным, 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 позволяет определить основные требования к модернизации ОГ ГЛОНАСС, реализация которых должна обеспечивать эффективность развития системы и которые состоят в следующем [4]:

1. Обеспечение выполнения показателей ФЦП в период 2012–2025 гг. 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 существующей навигационной аппаратуры, функционирующей по 24-м 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 финансовых и временных затрат на проведение модернизации.

7. Обеспечение высокого уровня характеристик РНП ГЛОНАСС в период перехода от существующей к модернизированной ОГ.

8. Открытость структуры ОГ к ее совершенствованию после 2020 г. с учетом дальнейшего развития системы.

Принципиально модернизация ОГ возможна на основе трех подходов (и их сочетании):

- реконструкция штатной ОГ (например, поднятие высоты орбиты);
- добавление к штатной ОГ дополнительных орбитальных сегментов;
- создание 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 направлений развития ОГ ГЛОНАСС, в том числе 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 [4; 5]. 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 кандидатов при выборе облика перспективной ОГ ГЛОНАСС.

Поэтому основные параметры (величины больших полуосей, наклонов) 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, ее наращивать за счет дополнительных орбитальных сегментов с предпочтительным сохранением орбитального периода и изотрассности модернизированной ОГ в целом.

С учетом указанных выше требований первоначально достаточно большое количество вариантов возможных структур построения орбитальной группировки системы ГЛОНАСС с новыми возможностя-

ми 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 [6]:

- ОГ-30А – 6-плоскостная ОГ на базе ОГ ГЛОНАСС-24 с 3-я 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 (бплх5) – 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 2 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 не номинальное срабатывание ДУ даже для одного КА приводит к ОГ с ухудшенными и непостоянными характеристиками РНП. Кроме того, необходимость сдвига штатных слотов приводит к определенному ухудшению характеристик РНП в процессе модернизации. Кроме того, последние 2 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 2 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 таблице.

Приведенные данные показывают, что наилучшие характеристики имеют трехплоскостная и шестиплоскостная ОГ с равномерным распределением КА вдоль орбиты.

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 \leq 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 \leq 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 \leq 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

Однако отличие их характеристик (особенно в части геометрического фактора – 3...4 %) 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 ОГ-30А далее проанализируем варианты ее реализации. Как было сказано выше, 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-х 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-и плоскостная изотрасная ОГ их 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), так как 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, является повышение уровня характеристик РНП ГЛОНАСС для существующей навигационной аппаратуры, функционирующей по 24-м 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-м 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 2 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 замена выбывших из функционирования штатных КА для НАП, функционирующей по 24-м КА, являются дополнительные 6 КА в составе модернизированной ОГ;

– вариант, при котором, в каждой плоскости устанавливается несколько КА, например по 2 полярно расположенных КА, без учета САС (случайным образом); такой вариант неэффективен для НАП функцио-

нирующей как по 24-м, так и по 30-ти 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-х 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. Т. е. 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-ти 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 замещения 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:

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 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 для при выбывании 2-х КА из штатной ОГ и их замене дополнительными КА. Сравнение ОГ 30А и 30Б, как основы для резервирования при ограничениях на работу с НАП только 24 аппаратами, показывает небольшое преимущество ОГ-30А.

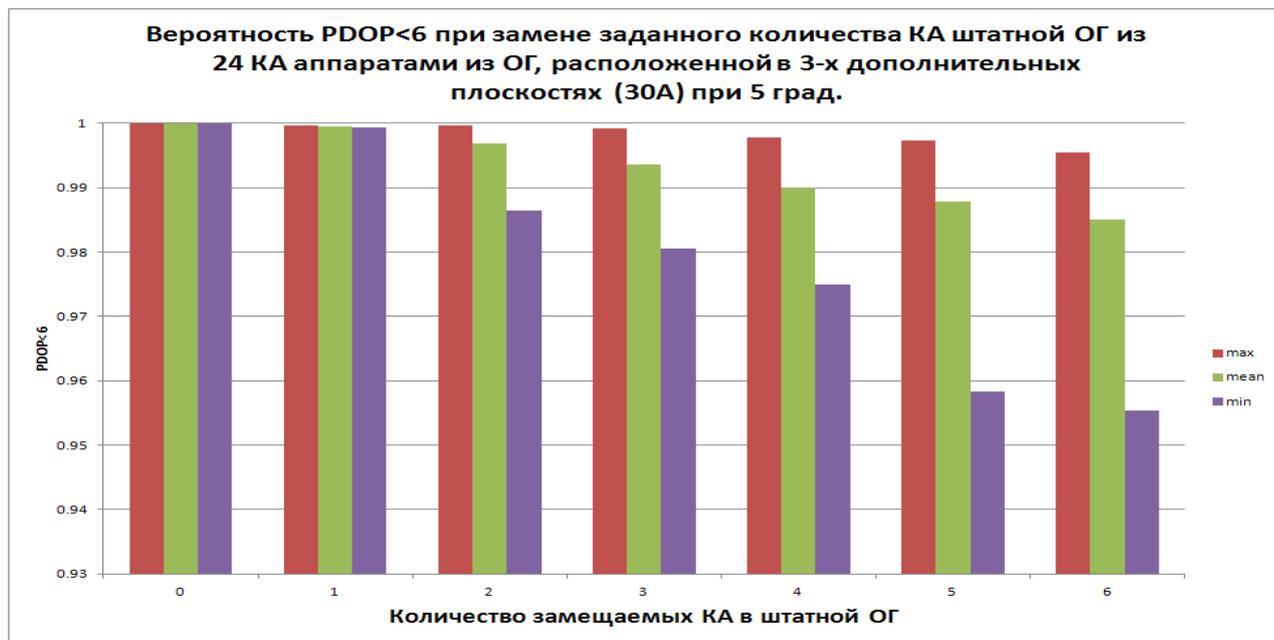


Рис. 1. Доступность PDOP<6 для ОГ 30А при формировании ОГ из 24 КА с учетом дополнительных КА (угол места 5°)

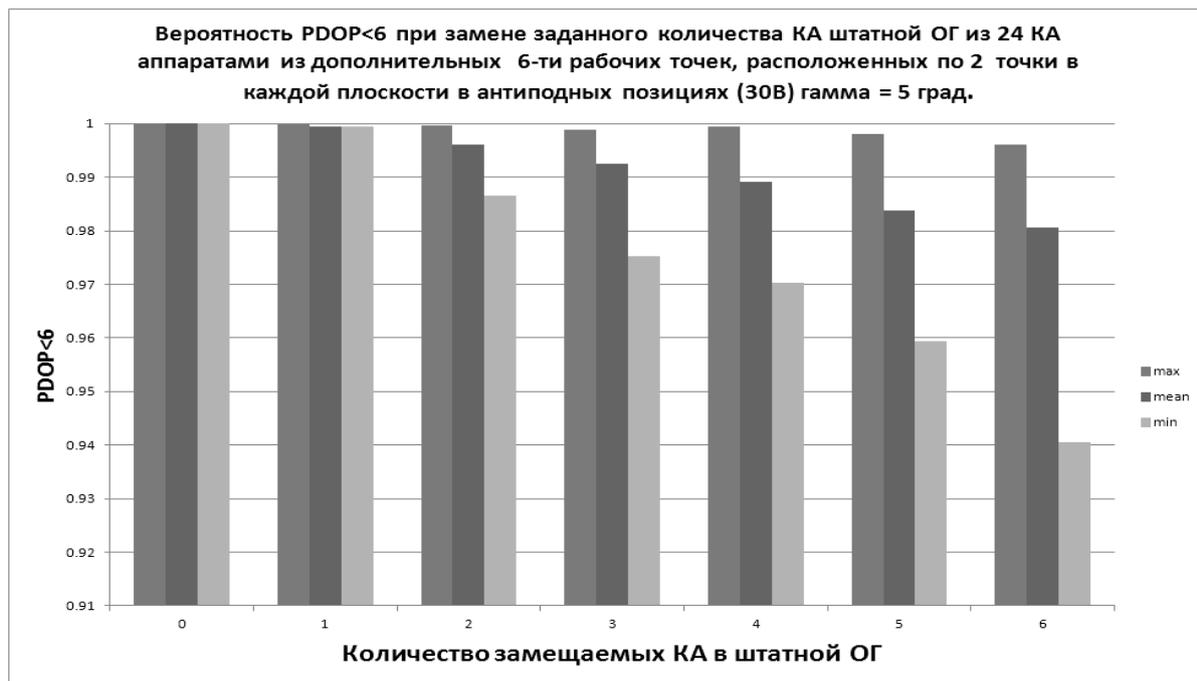


Рис. 2. Доступность PDOP < 6 для ОГ 30Б при формировании ОГ из 24 КА с учетом дополнительных КА (угол места 5°)

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 наклонений 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 наклонений, 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 начальной даты и одинаков для всех КА одной плоскости.

Для орбит КА типа ГЛОНАСС-24 изменение внутривосходящего расстояния между двумя КА по аргументу широты и имеет характер, близкий к линейному и за 10 лет полета не превышает:

- для ОГ ГЛОНАСС-24 и ОГ-30А – 1...2° относительно номинального значения 45° (в этом случае скажется изотрасность ОГ);
- для ОГ-30 (ОГ с равномерным распределением КА) – 2...4° относительно номинального значения 36° (в 2 раза больше предыдущих значений из-за отсутствия изотрасности);
- для ОГ-30Б – 5...6° относительно расстояния в 22.5° между «антиподным» и соседними КА, что в 3...5 раз выше эволюции для номинальных КА, равной 1...2°.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что все перечисленные орбитальные группировки и 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 гг.

1. Исходя из тенденций развития ГНСС и различных вариантов модернизации ОГ ГЛОНАСС следует, что в целях обеспечения показателей ФЦП и конку-

рентоспособности системы необходимо увеличение до 2020 г. 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 г. 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-м КА ГЛОНАСС) на основе стратегии оперативного переключения режимов функционирования части дополнительных КА в случае выхода из строя до 6-ти 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 существующий навигационный кадр в диапазоне L1 сигналов с частотным разделением для передачи в составе альманаха данных о не менее чем 30-ти КА, которые к 2020 г. 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 так же 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) перезагрузки 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. М., 2007 [Электронный ресурс]. URL: <http://aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf>.
2. Комплекс-ЦН : науч.-исслед. работа. М. : ФГУП ЦНИИмаш, 2011.
3. Назаренко А. И., Скребушевский Б. С. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. М. : Машиностроение, 1981.
4. Концепция Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012–2020 гг. (проект). 6 июня 2011.
5. GPS World Magazine, 01/2007-04/2012.
6. Ревнивых С. Г. Спутниковые системы. Тенденции развития глобальной спутниковой навигации : доклад на 19 междунар. конф. по интегрированным навигационным системам в ЦНИИ Электроприбор. Санкт-Петербург, май 2012.

References

1. *GLONASS. Interfejsnyy kontrol'nyy dokument, redaktsiya 5.1* (The GLONASS. Interface Control Document, Edition 5.1). Moscow. 2007. Available at: <http://aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf>.
2. "Complex CN" R&D, Information and Analysis Center for PNT of the Central Research Institute of Machine Building. 2011.

3. Nazarenko A. I., Skrebushevsky B. S. *Evolyutsiya i ustoychivost' sputnikovyykh sistem* (Evolution and stability of satellite systems). Moscow, Mashinostroyeniye, 1981.

4. *Kontseptsiya Federal'noy tselevoy programmy "Podderzhaniye, razvitiye i ispol'zovaniye sistemy GLONASS" na 2012–2020 gody* (Concept of the "Maintenance, development, and exploitation of the GLONASS system in 2012–2020"). Federal Program, Draft, 6 of July 2011.

5. GPS World Magazine, 01/2007-04/2012.

6. Revnivyykh S. G. *Sputnikovyye sistemy. Tendentsii razvitiya global'noy sputnikovoy navigatsii, doklad na 19 mezhdunar. konf. po integrirrovannym navigatsionnym sistemam v TSNII Elektropribor* (Satellite systems, tendencies of the global satellite navigation development, Report at the 19-th Int. Conf. devoted to integrated navigation systems, the "Electropribor" Central Research Institute), St. Petersburg, May, 2012.

© 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

УДК 621.396.99

АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ГНСС

М. К. Головин, О. Е. Лопатко, В. В. Тюбалин, Ю. С. Яскин

ОАО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»

Россия, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

E-mail: mihailgolovin@bk.ru, olopatko@rambler.ru, v.tyubalin@mail.ru, oaoniikp@mail.ru

Рассматриваются основные характеристики разработанной в ОАО «НИИ КП» аппаратуры контроля навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Аппаратура разработана в 2-х вариантах: мобильном и стационарном. Мобильный вариант позволяет контролировать открытые навигационные сигналы систем ГЛОНАСС и GPS.

Стационарный вариант рассчитан на контроль навигационных сигналов всех известных в настоящее время ГНСС и их функциональных дополнений. В состав стационарного варианта помимо основных приемников сигналов ГНСС входит специализированный приемник с остронаправленной антенной, что позволяет дополнительно оценивать энергетические, спектральные характеристики навигационных сигналов, а также их искажения.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, навигационные сигналы, аппаратура контроля.

GNSS NAVIGATION SIGNALS MONITORING EQUIPMENT

M. K. Golovin, O. E. Lopatko, V. V. Tyubalin, Yu. S. Yaskin

Joint-Stock Company "Institute of Space Device Engineering"

53 Aviamotornaya str., Moscow, 111250, Russia

E-mail: mihailgolovin@bk.ru, olopatko@rambler.ru, v.tyubalin@mail.ru, oaoniikp@mail.ru

The report reviews the key features of GNSS navigation signals monitoring equipment.

The monitoring equipment was developed in two design options: mobile and stationary. The mobile option allows to control the open GLONASS/GPS navigation signals.

The stationary option was designed to control the navigation signals of all GNSS and their augmentations known at present time. The stationary design option contains a special-purpose receiver equipped with a narrow-beam aerial which allows to estimate the power, spectral characteristics of navigation signals, as well as their distortions.

Keywords: GNSS, GLONASS, GPS, navigation signals, monitoring equipment.

Для большинства пользователей глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) обеспечивают адекватные характеристики и точность. Ситуация изменяется, когда появляется потребность использовать ГНСС для применений, связанных с безопасностью жизни, таких, например, как посадка самолета.

В этом случае такие характеристики ГНСС как точность, доступность, целостность и непрерывность должны быть гарантированы с высокой вероятностью. Эти характеристики определяются в основном параметрами навигационных сигналов, что определяет необходимость их контроля.