

Архитектура орбитальной группировки ГЛОНАСС, обеспечивающая глобальное выполнение перспективных требований по среднему значению пространственного геометрического фактора

© В.М. Мещеряков, В.Ф. Брагинец, Ю.Г. Сухой

Филиал «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения»
АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», г. Королёв, 141092, Россия

Проведено сравнение вариантов совершенствования архитектуры орбитальной группировки ГЛОНАСС путем дополнения штатной орбитальной группировки высокоорбитальным космическим комплексом из 6 спутников на эллиптических геосинхронных орбитах и путем модификации орбитальной группировки за счет размещения добавляемых спутников ГЛОНАСС в дополнительных или существующих орбитальных плоскостях. Показано, что вариант дополнения системы ГЛОНАСС высокоорбитальным космическим комплексом является сложным в реализации по причине использования другого типа орбиты и обеспечивает выполнение требований Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг.» по среднему значению пространственного геометрического фактора не более 1,85 только на территории Российской Федерации. Наименее затратным и удовлетворяющим данным требованиям для высоких широт (более 49°) и во всем диапазоне долгот является добавление в штатную орбитальную группировку ГЛОНАСС 6 спутников (по два в каждую из существующих плоскостей) с перераспределением фазового сдвига между всеми спутниками. Добавление в каждую из существующих плоскостей по 4 спутника ГЛОНАСС с перераспределением фазового сдвига между ними позволит обеспечить глобально для нормальных условий наблюдения значение пространственного геометрического фактора не более 1,75 и максимальную по сравнению с другими рассмотренными вариантами доступность навигационного поля в сложных условиях наблюдения.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, пространственный геометрический фактор, навигационный спутник, эллиптическая орбита, орбитальная плоскость, доступность навигационного поля, угол места

Введение. Наряду с разработкой перспективных навигационных спутников системы ГЛОНАСС [1, 2] с длительным сроком активного существования и более совершенной бортовой аппаратурой в качестве перспективного направления повышения потребительских характеристик системы ГЛОНАСС рассмотрены варианты совершенствования орбитальной структуры системы [3–6]. В соответствии с Приложением № 3 Федеральной целевой программы (ФЦП) «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг.» архитектура орбитальной группировки ГЛОНАСС должна обеспечивать среднее значение пространственного геометрического фактора 1,85.

В качестве основных возможных направлений совершенствования архитектуры построения орбитальной группировки (ОГ) системы ГЛОНАСС можно выделить следующие:

1) дополнение штатной ОГ высокоорбитальным космическим комплексом (ВКК) с навигационными космическими аппаратами (КА) на орбитах «Тундра», «Арктика» [7–10] или QZSS [4, 10];

2) модификация существующей ОГ ГЛОНАСС [3].

Все большую актуальность приобретает задача выбора наиболее рационального с точки зрения выполнения перспективных требований по показателям плотности и доступности навигационного поля для потребителей при минимуме затрат на практическую реализацию варианта совершенствования архитектуры орбитальной группировки ГЛОНАСС.

В части дополнения ВКК в настоящей статье рассмотрены орбиты типа QZSS. Японская региональная квазизенитная навигационная система Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) является высокоорбитальным дополнением к навигационной системе GPS, которое обеспечивает повышение плотности навигационного поля и улучшение точности определения координат наземного потребителя в регионе Японских островов [4]. По проекту система состоит из трех спутников, расположенных на высокоэллиптических геосинхронных орбитах в трех плоскостях с наклоном $43^\circ \dots 4^\circ$ и эксцентриситетом $0,075 \dots 0,015$. Разнесение плоскостей по долготе составляет 120° , аргумент перигея — $270^\circ \dots 2^\circ$. Центральная долгота наземной трассы составляет $135^\circ \dots 4^\circ$ в. д. QZSS обеспечивает увеличение среднего числа видимых навигационных спутников в районе Токио с 4,7 до 6,7 [4]. Для достижения аналогичного эффекта на территории Российской Федерации (в диапазонах широт $45^\circ \dots 70^\circ$ и долгот $20^\circ \dots 180^\circ$) данная высокоорбитальная система была модифицирована. Наклонение орбит принято равным $64,8^\circ$ (как у КА ГЛОНАСС [1]), эксцентриситет — 0,072. Орбитальные плоскости по восходящим узлам орбиты равномерно размещены между плоскостями существующей структуры ГЛОНАСС. Количество спутников увеличено до 6 (по два в каждой плоскости). Они разнесены в орбитальной плоскости по средней аномалии на 60° . Фазовое разнесение между средними точками двух спутников соседних плоскостей составляет 120° . Центральные долготы наземных трасс выбраны равными 70° в. д. и 130° в. д., чтобы средняя долгота между ними, равная 100° , соответствовала середине диапазона долгот территории Российской Федерации. При таком построении дополняющего ВКК 3–5 спутников из 6 на высокоэллиптических орбитах гарантированно попадают в зону видимости потребителей на территории Российской Федерации.

В настоящей статье проведено сравнение варианта дополнения штатной ОГ ГЛОНАСС высокоорбитальным космическим комплек-

сом из 6 спутников с вариантами модификации орбитальной структуры ГЛОНАСС путем добавления в штатные плоскости 2 или 4 спутников и дополнения системы ГЛОНАСС тремя плоскостями, расположенными между штатными, с размещением по два или по четыре спутника в каждой из них.

Критерии оценивания орбитальных структур. Указанные варианты были сравнены между собой, а также со штатной орбитальной структурой ГЛОНАСС для различных широт размещения потребителя.

В качестве показателей эффективности рассматриваемых орбитальных структур выбраны:

1) осредненный по времени и долготе пространственный геометрический фактор (ГФ) (показатель $PDOP_{cp}$) для углов места $\gamma \geq 10^\circ$ (нормальные условия наблюдения) [3];

2) доступность навигационного поля по уровню $PDOP \leq 6$ (показатель P_6 , характеризующий процент времени наблюдения спутников на интервале осреднения, в течение которого пространственный геометрический фактор не превышает заданного значения $PDOP = 6$) для углов места $\gamma \geq 25^\circ$ и $\gamma \geq 40^\circ$ (сложные условия наблюдения) [3].

Наиболее эффективные варианты орбитальных структур выбирались по критериям минимума $PDOP_{cp}$ или максимума P_6 . Интервал осреднения по времени выбирали равным периоду повторяемости трасс КА ГЛОНАСС (8 суток). Положим, что дискретность наблюдений равна 2 мин [3]. Расчеты проведены для широт 45° , 55° и 65° и долгот в диапазоне $-180^\circ \dots 180^\circ$ с шагом 5° . Проанализированы зависимости оцениваемых характеристик от долготы расположения потребителей для рассматриваемых значений зафиксированных широт.

Результаты оценивания орбитальных структур для нормальных условий наблюдения. На рис. 1–3 представлены результаты оценивания показателей в нормальных условиях наблюдения ($\gamma \geq 10^\circ$) для рассматриваемых широт (45° , 55° , 65°) расположения потребителя. Оценки показателя $PDOP_{cp}$ приведены в виде графиков функций долготы расположения потребителя L для следующих вариантов сформированных структур орбитальных группировок (ОГ):

1) штатной ОГ системы ГЛОНАСС, включающей 24 космических аппарата (3 плоскости по 8 КА);

2) штатной ОГ, дополненной ВКК из 6 КА (3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК);

3) дополнения 6 КА в орбитальные плоскости штатной ОГ (3 плоскости по 10 КА);

4) дополнения 12 КА в орбитальные плоскости штатной ОГ (3 плоскости по 12 КА);

5) дополнения 6 КА в 3 дополнительные плоскости между плоскостями штатной ОГ (3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА);

6) дополнения 12 КА в 3 дополнительные плоскости между плоскостями штатной ОГ (3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА).

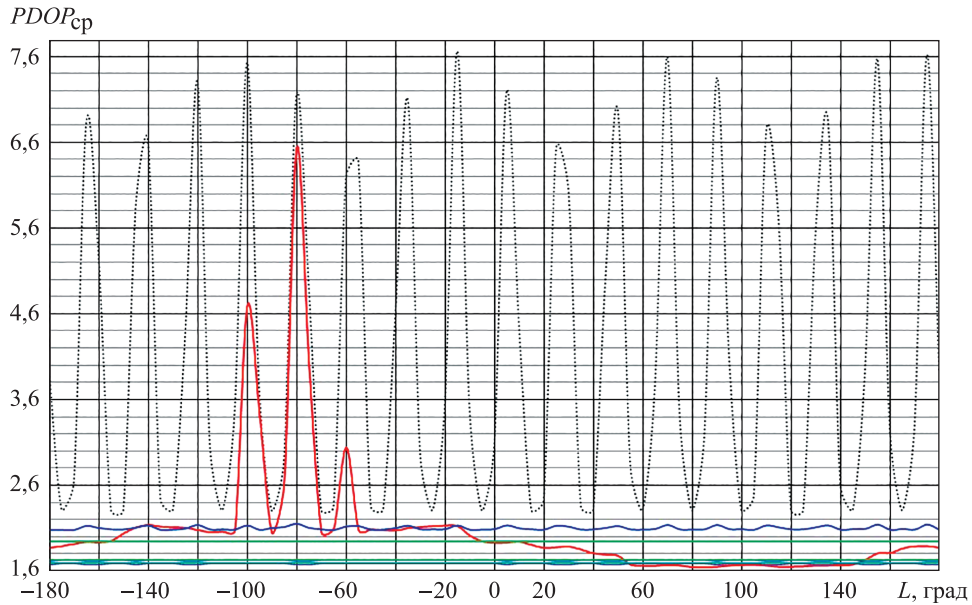


Рис. 1. Изменение $PDOP_{ср}$ в зависимости от долготы потребителя на широте 45° для разных структур ОГ в нормальных условиях наблюдения:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; — 3 плоскости по 10 КА; — 3 плоскости по 12 КА

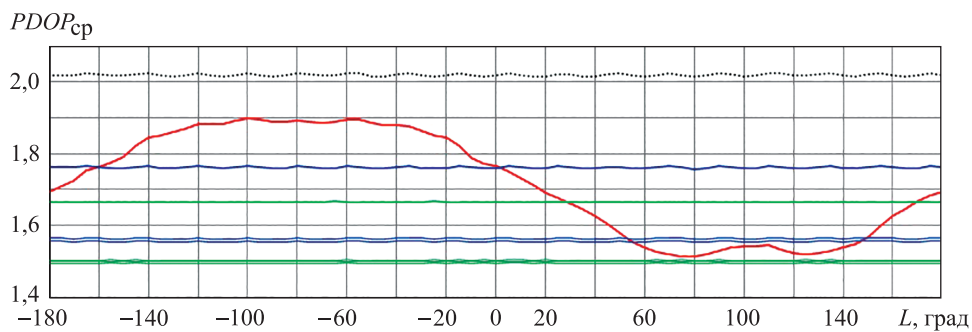


Рис. 2. Изменение $PDOP_{ср}$ в зависимости от долготы потребителя на широте 55° для разных структур ОГ в нормальных условиях наблюдения:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; — 3 плоскости по 10 КА; — 3 плоскости по 12 КА

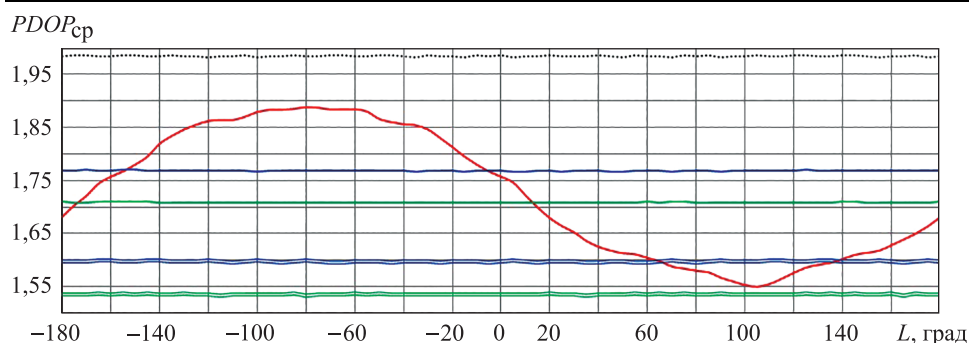


Рис. 3. Изменение $PDOP_{ср}$ в зависимости от долготы потребителя на широте 65° для разных структур ОГ в нормальных условиях наблюдения:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; — 3 плоскости по 10 КА; — 3 плоскости по 12 КА

По результатам анализа графиков, приведенных на рис. 1 для широты 45° , установлено, что для контрольного варианта (штатной ОГ) наблюдается большая вариация значения среднего пространственного ГФ при изменении долготы потребителя. Такой же разброс наблюдается и для варианта дополнения ВКК на отрицательных долготах в западном полушарии, где не обеспечиваются требуемые условия видимости дополнительных спутников наземными потребителями. На долготах, где значение среднего ГФ достигает локальных максимумов, доля наблюдений с $PDOP \gg 6$ доходит до 3 % от общего количества, а на долготах с локальными минимумами среднего ГФ уменьшается до нуля.

В результате сравнения графиков (см. рис. 1–3) для различных вариантов структур ОГ выявлено следующее. В диапазоне $20^\circ \dots 180^\circ$ в. д. (территория Российской Федерации) вариант дополнения ВКК по своему осредненному значению ГФ близок к варианту добавления к штатной ОГ 12 спутников ГЛОНАСС в трех дополнительных плоскостях. При этом для варианта добавления спутников ГЛОНАСС значение $PDOP_{ср}$ не изменяется от долготы во всем диапазоне ее изменения. В то время для варианта дополнения ВКК в середине диапазона долгот территории России значение $PDOP_{ср}$ оказывается меньше, а на краях — больше значения ГФ для варианта добавления 12 спутников ГЛОНАСС в дополнительные плоскости.

Для варианта добавления 6 спутников ГЛОНАСС в штатные плоскости средний ГФ в диапазоне долгот территории России оказывается больше, чем для варианта дополнения ВКК. В то же время превышение по абсолютному значению $PDOP_{ср}$ составляет для широты 45° не более 0,3, а для широт 55° и 65° не более 0,2, что по отношению к величине самого ГФ составляет от 15 до 18 %. Наименьшее значение пространственного ГФ во всем диапазоне долгот обеспечивается при добавлении 12 спутников ГЛОНАСС в штатные плоскости.

По результатам расчетов, полученных для модифицированных орбитальных структур ГЛОНАСС в нормальных условиях наблюдения, можно заключить, что наименьший средний ГФ глобально обеспечивается при дополнении штатной орбитальной структуры 12 спутниками (добавление по четыре аппарата в каждую штатную плоскость). Дополнение ВКК из 6 спутников в трех плоскостях дает в среднем такой же эффект, что и дополнение штатной орбитальной структуры ГЛОНАСС 12 спутниками в трех дополнительных плоскостях, но только на территории Российской Федерации, в то время как при дополнении ОГ ГЛОНАСС 12 спутниками обеспечивается выполнение требований по среднему геометрическому фактору глобально. Уменьшение количества дополнительно размещаемых в штатных плоскостях спутников с 12 до 6 (до двух в каждой плоскости) приводит к увеличению среднего ГФ в пределах территории РФ не более чем на 18 % по сравнению с дополнением системы ВКК из 6 спутников.

Результаты оценивания орбитальных структур для сложных условий наблюдения. Для сравнительного анализа эффективности рассматриваемых орбитальных структур в сложных условиях наблюдения проведены расчеты показателя доступности навигационного поля P_6 по критерию $PDOP \leq 6$ для углов места $\gamma = 25^\circ$ и $\gamma = 40^\circ$. Изменение показателя P_6 в зависимости от широты для $\gamma = 25^\circ$ представлено на рис. 4–6, а для $\gamma = 40^\circ$ — на рис. 7–9.

В ходе анализа графиков, приведенных на рис. 4–6 для $\gamma = 25^\circ$, выявлено, что стопроцентное значение показателя P_6 обеспечивается для варианта размещения 12 дополнительных спутников в штатные плоскости. На высоких широтах (см. рис. 6) такой же эффект обеспечивается и при размещении по два дополнительных спутника в существующие плоскости.

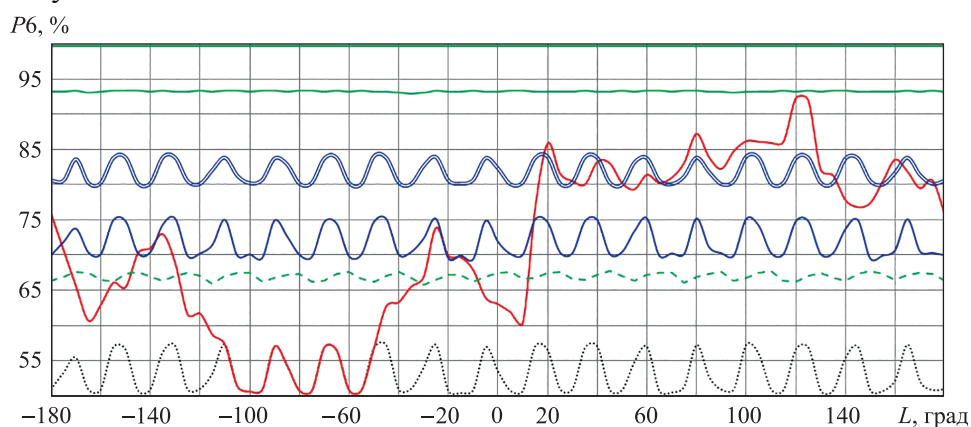


Рис. 4. Изменение показателя доступности навигационного поля P_6 в зависимости от долготы потребителя на широте 45° при $\gamma = 25^\circ$:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; - - - — 3 плоскости по 9 КА; — 3 плоскости по 10 КА;
 — 3 плоскости по 12 КА

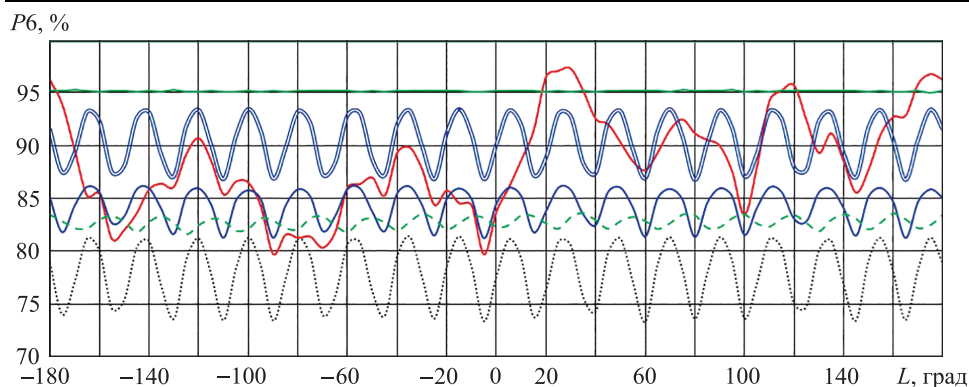


Рис. 5. Изменение показателя доступности навигационного поля P_6 в зависимости от долготы потребителя на широте 55° при $\gamma = 25^\circ$:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 2 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА;
 - - - — 3 плоскости по 9 КА; — 3 плоскости по 10 КА;
 — 3 плоскости по 12 КА

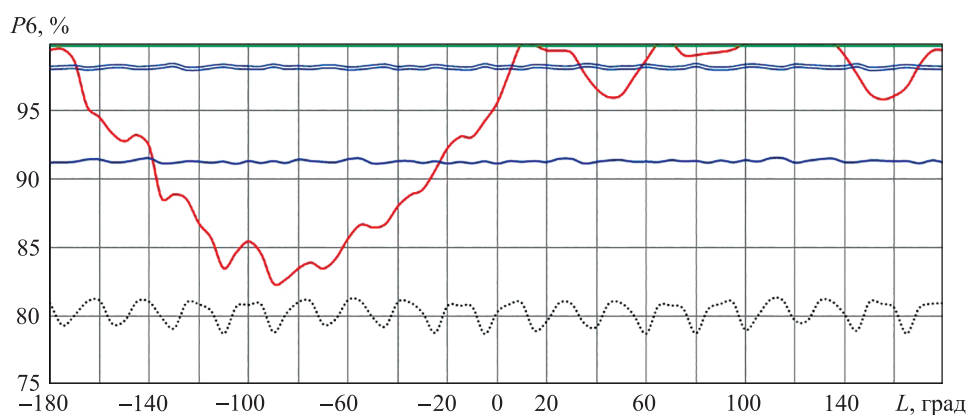


Рис. 6. Изменение показателя доступности навигационного поля P_6 в зависимости от долготы потребителя на широте 65° при $\gamma = 25^\circ$:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА;
 — 3 плоскости по 10–12 КА

Вариант дополнения ВКК из 6 спутников в пределах диапазона долгот территории РФ на низких и средних широтах (рис. 4, 5) существенно уступает по показателю P_6 варианту размещения такого же количества дополнительных спутников ГЛОНАСС в существующих плоскостях.

По осредненному в пределах долгот территории России показателю P_6 вариант дополнения ВКК из 6 спутников близок к варианту добавления в штатную ОГ 12 спутников ГЛОНАСС в трех дополнительных орбитальных плоскостях. Следует отметить особенность изменения колебаний величины P_6 с возрастанием количества добавляемых спутников

для вариантов их размещения в дополнительных и штатных плоскостях. В первом случае вариации почти не уменьшаются, тогда как во втором случае при добавлении всего по одному спутнику в каждую штатную плоскость (графики для ОГ на рис. 4, 5 показаны штриховой линией зеленого цвета) амплитуда колебаний P_6 уменьшается в несколько раз. При увеличении числа добавляемых в штатные плоскости спутников до двух и более вариации P_6 в зависимости от изменения долготы не наблюдаются.

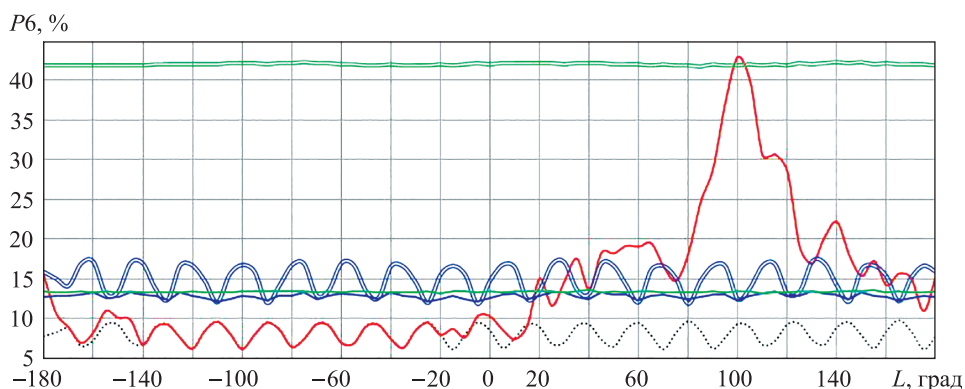


Рис. 7. Изменение показателя доступности навигационного поля P_6 в зависимости от долготы потребителя на широте 45° при $\gamma = 40^\circ$:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; — 3 плоскости по 12 КА

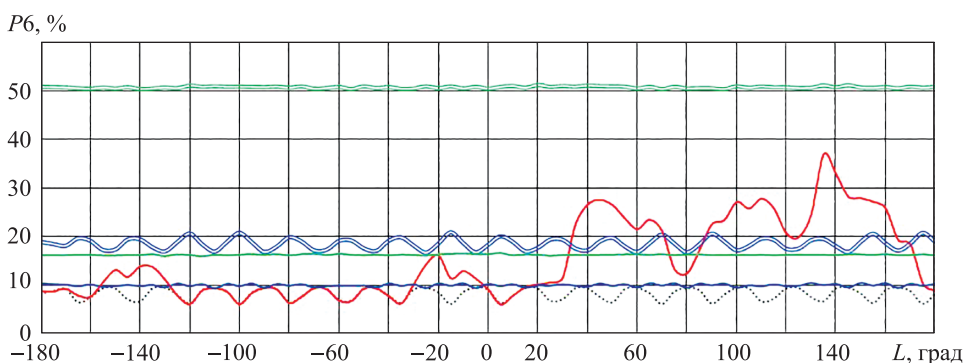


Рис. 8. Изменение показателя доступности навигационного поля P_6 в зависимости от долготы потребителя на широте 55° при $\gamma = 40^\circ$:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 2 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; — 3 плоскости по 10 КА; — 3 плоскости по 12 КА

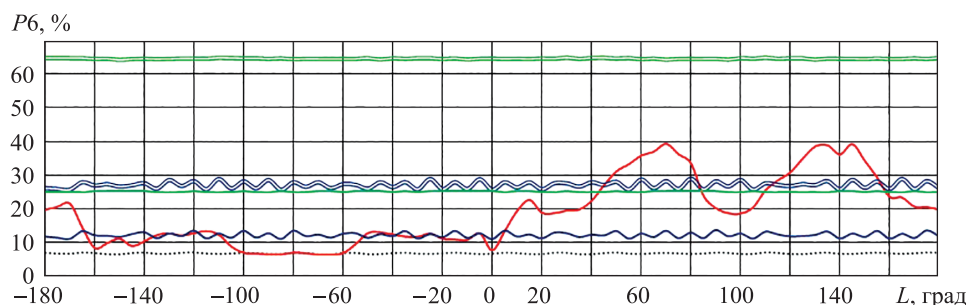


Рис. 9. Изменение показателя доступности навигационного поля P_6 в зависимости от долготы потребителя на широте 65° при $\gamma = 40^\circ$:

..... — 3 плоскости по 8 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА ВКК;
 — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 2 КА; — 3 плоскости по 8 КА и 3 плоскости по 4 КА; — 3 плоскости по 10 КА; — 3 плоскости по 12 КА

По данным анализа графиков, приведенных на рис. 7–9 для $\gamma = 40^\circ$, максимальное значение показателя P_6 на всех долготах обеспечивается для варианта добавления по четыре дополнительных спутника в каждую из штатных плоскостей. Исключение составляет лишь вариант дополнения ВКК при размещении потребителя вблизи точки с широтой 45° и долготой 100° (см. рис. 7). По осредненному в пределах долгот на территории РФ значению показателя P_6 вариант дополнения ВКК оказывается близким к вариантам добавления 12 спутников в дополнительные плоскости или добавления 6 спутников в существующие плоскости. Лишь на широтах, близких к 45° , в диапазоне долгот $80^\circ \dots 130^\circ$ вариант дополнения ВКК имеет преимущество над другими вариантами (см. рис. 7).

Результаты расчетов для сложных условий наблюдения служат подтверждением того, что наилучшая доступность обеспечивается при добавлении в штатные плоскости 12 КА (по четыре КА в каждую плоскость). Вариант дополнения ВКК из 6 спутников существенно уступает ему по доступности, за исключением случаев нахождения потребителя вблизи точки с широтой нижней границы диапазона широт и долготой середины диапазона долгот территории России. В случае наблюдения спутников в условиях сильно пересеченной местности (или малоэтажной застройки) для углов места более 25° , в пределах территории России вариант дополнения ВКК из 6 спутников по среднему показателю P_6 близок к варианту добавления 12 спутников ГЛОНАСС в дополнительные плоскости, но уступает варианту добавления 6 спутников в существующие плоскости примерно на 10–15%.

При наблюдении в горной местности (или в условиях многоэтажной застройки) для углов места более 40° на территории РФ вариант дополнения ВКК из 6 спутников по среднему показателю P_6 близок к вариантам добавления 12 спутников ГЛОНАСС в дополнительные

плоскости и добавления 6 спутников в штатные плоскости. Исключение составляет лишь случай расположения потребителя вблизи точки с широтой 45° и в диапазоне долгот $80^\circ \dots 130^\circ$, где дополнение ВКК имеет преимущество.

Заключение. Проведено сравнение вариантов дополнения штатной орбитальной структуры ГЛОНАСС высокоорбитальным космическим комплексом из 6 спутников на эллиптических геосинхронных орбитах с вариантами расширения орбитальной структуры ГЛОНАСС без применения ВКК по критериям среднего пространственного геометрического фактора ($PDOP_{cp}$) и доступности навигационного поля для значений $PDOP \leq 6$ (показатель $P6$). Вариант дополнения системы ГЛОНАСС высокоорбитальным космическим комплексом является сложным в реализации ввиду использования орбиты другого типа и обеспечивает выполнение требований ФЦП по среднему значению $PDOP$ ($PDOP_{cp}$) только на территории Российской Федерации. Вариант дополнения системы с размещением 6–12 КА ГЛОНАСС в дополнительных орбитальных плоскостях, расположенных между штатными (по два или четыре аппарата в каждой из трех плоскостей), сопоставим по оцениваемым параметрам с вариантом добавления в систему 6–12 КА в штатные орбитальные плоскости (по два или четыре аппарата в каждую из плоскостей). Однако для его реализации потребуется изменение технологии восполнения и поддержания орбитальной структуры ГЛОНАСС. Наименее затратным и удовлетворяющим требованиям Федеральной целевой программы [6] на 2020 г. ($PDOP \leq 1,85$) для высоких широт (более 49°) является вариант дополнения системы ГЛОНАСС 6 КА в штатные орбитальные плоскости (по два аппарата в каждую из плоскостей) с перераспределением фазового сдвига между всеми КА. Добавление в каждую из штатных плоскостей по четыре аппарата с перераспределением фазового сдвига между КА позволит обеспечить глобально значение $PDOP \leq 1,75$ и максимальную по сравнению с другими вариантами модернизации орбитальной структуры ГЛОНАСС доступность навигационного поля по критерию $PDOP \leq 6$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьёв Ю.А. *Спутниковая навигация и ее приложения*. Москва, Экотрендз, 2003, 326 с.
- [2] Красильников А.Н. Замена старого молодым в системе ГЛОНАСС. *Новости космонавтики*, 2017, т. 27, № 11 (418), с. 33–35.
- [3] Брагинец В.Ф., Мещеряков В.М., Сухой Ю.Г. Сравнение вариантов построения орбитальной группировки ГЛОНАСС в целях совершенствования ее структуры для наблюдения навигационных спутников. *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, вып. 1 (94), с. 95–102.
- [4] Соловьёв Ю.А., Царёв А.В., Коровин А.В., Устюжанин Д.А. Азиатские региональные спутниковые навигационные системы и широкозонные дифференциальные подсистемы ГНСС. *Новости навигации*, 2009, № 2, с. 25–33.

- [5] Игнатович Е.И., Сердюков А.И., Балашова Н.Н., Синцова Л.Н., Золкин И.А., Болкунов А.И. Анализ вариантов модернизированных орбитальных группировок, обеспечивающих конкурентоспособность системы ГЛОНАСС. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2014, № 1, с. 20–29.
- [6] Гриценко А.А., Юрьев Р.Н. Подвижная спутниковая связь в России и Арктике — выбор орбитальной группировки. *Инфосфера*, 2015, № 66, с. 9–12.
- [7] Анпилогов В.Р. О проблемах спутниковой связи и вещания в Арктике. *Технологии и средства связи. Спец. выпуск «Спутниковая связь и вещание — 2014»*, 2013, № 6 (2), с. 24–31.
- [8] Шалагинов А.А. Проекты многофункциональных систем для Арктических регионов России. *Технологии и средства связи. Спец. выпуск «Спутниковая связь и вещание — 2014»*, 2013, № 6 (2), с. 16–17.
- [9] Степанов А.А., Акимов А.А., Гриценко А.А., Чазов В.В. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи. *Технологии и средства связи. Спец. выпуск «Спутниковая связь и вещание — 2016»*, 2016, с. 72–86.
- [10] Камнев Е.Ф., Аболиц А.А., Акимов А.А., Белов А.С., Бобков В.Ю., Пелехатый М.И. *Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой*. Москва, Изд-во Глобсатком, 2009, 723 с.

Статья поступила в редакцию 30.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Архитектура орбитальной группировки ГЛОНАСС, обеспечивающая глобальное выполнение перспективных требований по среднему значению пространственного геометрического фактора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1816>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2018 года

Мещеряков Владимир Михайлович — канд. техн. наук, инженер 1-й категории филиала «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 20 работ в области космической баллистики.

Брагинец Владимир Феодосиевич — канд. техн. наук, начальник отдела — главный конструктор направления филиала «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 70 работ в области космической баллистики.
e-mail: braginet@spnav.ru

Сухой Юрий Георгиевич — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник филиала «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 120 работ в области космической баллистики. e-mail: sukhoi@spnav.ru

The GLONASS orbit constellation architecture, which provides global fulfillment of promising requirements by the average value of the spatial geometric factor

© V.M. Mescheryakov, V.F. Braginets, Yu.G. Sukhoy

“Precision Navigation and Ballistic Support”, branch of Joint-stock Company
“Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments”,
Korolyov, 141092, Russia

The purpose of the research was to compare the options for improving the GLONASS orbital constellation architecture by completing the standard orbital constellation with a high-orbit space complex of six satellites in elliptical geosynchronous orbits and by modifying the orbital constellation placing the GLONASS satellites in additional or existing orbital planes. The study shows that the option of adding a high-orbit space complex to the GLONASS system is difficult to implement due to the use of a different type of orbit and ensures that the requirements of the Federal Target Program “Maintaining, developing and using the GLONASS system for 2012–2020” are met according to the average spatial geometric factor of not more than 1.85 only in the Russian Federation. The least costly and satisfying these requirements for high latitudes (more than 49°) and in the entire range of longitudes is the addition of 6 satellites (two to each of the existing planes) to the standard GLONASS orbital constellation, the phase shift between all satellites being redistributed. For normal observation conditions, adding to each of the existing planes of four GLONASS satellites with a redistribution of the phase shift between them will globally ensure the spatial geometric factor of not more than 1.75 and the maximum, compared to the other options considered, availability of the navigation field in difficult observation conditions.

Keywords: GLONASS, spatial geometric factor, navigation satellite, elliptic orbit, orbital plane, availability of the navigation field, elevation angle

REFERENCES

- [1] Solov'ev Yu.A. *Sputnikovaya navigatsiya i ee prilozheniya* [Satellite navigation and its applications]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2003, 326 p.
- [2] Krasil'nikov A.N. *Novosti kosmonavтики (Cosmonautics news)*, 2017, no. 11 (418), vol. 27, pp. 33–35.
- [3] Braginets V.F., Mescheryakov V.M., Sukhoy Yu.G.. *Kosmonavtika i raketo-stroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 1 (94), pp. 95–102.
- [4] Solov'ev Yu.A., Tsarev A.V., Korovin A.V., Ustyuzhanin D.A. *Novosti navigatsii (Navigation news)*, 2009, no. 2, pp. 25–33.
- [5] Ignatovich E.I., Serdyukov A.I., Balashova N.N., Sintsova L.N., Zolkin I.A., Bolkunov A.I. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhicheskiy zhurnal “Polet” — All-Russian Scientific-Technical Journal “Polyot” (“Flight”)*, 2014, no. 1, pp. 20–29.
- [6] Gritsenko A.A., Yur'ev R.N. *Infosfera (Infosphere)*, 2015, no. 66, pp. 9–12.
- [7] Anpilogov V.R. *Tekhnologii i sredstva svyazi. Spets. vypusk “Sputnikovaya svyaz i veshchanie — 2014” (Technology and communications. Spec. no. “Satellite Communications and Broadcasting — 2014”)*, 2013, no. 6 (2), pp. 24–31.

- [8] Shalaginov A.A. *Tekhnologii i sredstva svyazi. Spets. vypusk "Sputnikovaya sviaz i veshchanie — 2014" (Technology and communications. Spec. no. "Satellite Communications and Broadcasting — 2014")*, 2013, no. 6 (2), pp. 16–17.
- [9] Stepanov A.A., Akimov A.A., Gritsenko A.A., Chazov V.V. *Tekhnologii i sredstva svyazi. Spets. vypusk "Sputnikovaya sviaz i veshchanie — 2016" (Technology and communications. Spec. no. "Satellite Communications and Broadcasting — 2016")*, 2016, pp. 72–86.
- [10] Kamnev E.F., Abolits A.A., Akimov A.A., Belov A.S., Bobkov V.Yu., Pelekhaty M.I. *Sistemy sputnikovoy svyazi s ellipticheskimi orbitami, razneseniem vetvey i adaptivnoy obrabotkoy* [Satellite communication systems with elliptic orbits, branch spacing and adaptive processing]. Moscow, Globstatkom Publ., 2009, 723 p.

Mescheryakov V.M., Cand. Sc. (Eng.), engineer of the first category, "Precision Navigation and Ballistic Support", branch of Joint-stock Company "Research-and-Production Corporation "Precision Systems and Instruments". Author of over 20 works in the field of space ballistics.

Braginets V.F., Cand. Sc. (Eng.), Head of Department— Chief designer of a direction, "Precision Navigation and Ballistic Support", branch of Joint-stock Company "Research-and-Production Corporation "Precision Systems and Instruments". Author of over 70 works in the field of space ballistics. e-mail: braginets@spnav.ru

Sukhoy Yu.G., Dr. Sc. (Eng.), leading research fellow "Precision Navigation and Ballistic Support", branch of Joint-stock Company "Research-and-Production Corporation "Precision Systems and Instruments". Author of over 120 works in the field of space ballistics. e-mail: sukhoy@spnav.ru