
**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ**

УДК 629.7

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ
МЕЖСПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ ЭФЕМЕРИД СОВРЕМЕННОГО И ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ОРБИТАЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ ГЛОНАСС**

© 2023 г. М. Н. Красильщиков^а, Д. М. Кружков^{а,*}, Т. А. Марарескул^б,
Е. А. Мартынов^а, Д.С. Муратов^б

^аМосковский авиационный институт (национальный исследовательский ун-т),
Москва, Россия

^бАО “ИСС” им. ак. М.Ф. Решетнева, Железногорск, Россия

*e-mail: kruzchkovd@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

После доработки 26.04.2023 г.

Принята к публикации 05.06.2023 г.

Приводится описание разработанной авторами информационной технологии обеспечения возможности функционирования без загрузки информации наземным комплексом управления при одновременном повышении точности эфемерид существующего средневысотного сегмента ГЛОНАСС и его перспективных дополнений. Достижение сформулированных целей в рамках обсуждаемой технологии предполагает формирование высокоточных эфемерид путем решения следующих взаимосвязанных задач: повышение точности определения и прогнозирования эфемерид навигационных космических аппаратов в инерциальной системе координат; совершенствование методов и алгоритмов прогнозирования и уточнения на борту космических аппаратов эволюции параметров вращения Земли; высокоточная синхронизация бортовых часов. Главное внимание уделяется первой из перечисленных задач, т.е. прогнозированию и уточнению эфемерид навигационных космических аппаратов в инерциальной системе координат, в том числе в режиме функционирования спутниковых группировок без обновления эфемеридно-временной информации. В качестве основы для ее решения предлагается использовать перспективные бортовые аппаратные средства проведения межспутниковых измерений. Обсуждаются базовые ограничения, связанные с реализацией межспутниковых измерений и последующей их обработкой как для средневысотного, так и для перспективных космических сегментов ГЛОНАСС. Приводятся результаты проектно-баллистического анализа и обработки реальных и моделируемых измерений, а также предварительные характеристики точности получаемых при этом на борту оценок эфемерид.

DOI: 10.31857/S0002338823050104, EDN: ODBVBH

Введение. В настоящее время перманентно существующая потребность улучшения потребительских характеристик глобальных навигационных систем (ГНСС) [1, 2] удовлетворяется путем решения совокупности перечисленных ниже взаимосвязанных технических проблем, приводящих в конечном счете к изменению эквивалентной погрешности определения псевдодалности потребителя (ЭППД) навигационных сигналов [3, 4], а именно:

- обеспечение высокой точности вычисляемых эфемерид навигационных спутников [2];
- уточнение эволюционирующих значений параметров вращения Земли (смещение полюса и поправка к Всемирному времени) [5–8];
- синхронизация бортовых часов с системными [2, 3];
- совершенствование характеристик бортовых аппаратных средств;
- уточнение задержек распространения сигналов;
- определение фактических выносов фазовых центров антенн навигационных спутников [9].

Одной из наиболее существенных по ее вкладу в итоговую погрешность решения навигационной задачи потребителя является проблема повышения точности эфемерид при их прогнозировании на средних и длительных временных интервалах (от половины суток и до нескольких недель) [10, 11]. В настоящий момент эта проблема решается на основе периодической реализации ряда процедур, включающих в том числе наблюдение за каждым навигационным космическим аппаратом (НКА) [3, 4, 12], сбор телеметрии и вычисление точных эфемерид с последующей загрузкой их на борт. В свою очередь стремление к повышению точности эфемерид и загружаемых так называемых согласующих параметров для их последующего прогноза на борту на короткие интервалы времени требует все более частого повторения упомянутых выше процедур, что неизбежно сталкивается с очевидными техническими и ресурсными ограничениями. Дополнительное обременение при этом состоит в необходимости обслуживания системных дополнительных спутниковых группировок, в частности перспективных высокоорбитальных сегментов (ВОС) ГЛОНАСС. Кроме того, необходимость получения каких-либо данных извне лишает систему возможности функционировать в автономном режиме с требуемой точностью. Избежать более частой загрузки данных можно, например, путем реализации на борту процедур высокоточного прогнозирования движения НКА, которые хоть на текущий момент и используются на коротких интервалах, но неприемлемы в силу неудовлетворительной точности прогноза на длительных интервалах [13, 14]. Основной проблемой, препятствующей реализации на борту высокоточного прогноза, является наличие неопределенных факторов в модели движения НКА [11], связанных с негауссовскими ошибками системы ориентации НКА и определением ускорения, вызываемого давлением солнечного света.

Таким образом, возникает задача совершенствования используемых процедур прогноза и последующего уточнения прогнозных эфемерид, которая без участия наземной инфраструктуры должна быть решена имеющимися на борту средствами, а именно с помощью перспективных антенных систем (АС) межспутниковых измерений (МСИ) и обмена информацией [13–16]. С учетом того, что количество полезной нагрузки на НКА продолжает расти, “свободного” времени в цикле функционирования бортового оборудования, энергетических и вычислительных мощностей, которые могли бы быть свободно выделены в нужном качестве и количестве на решение обсуждаемой задачи, фактически не существует. Это приводит к появлению дополнительных ограничений применительно к диапазонам допустимых дальностей для проведения сеансов измерений, времени обмена информацией и углам визирования объектов взаимодействия в составе спутниковых группировок.

С учетом сказанного задача уточнения эфемерид НКА всей спутниковой группировки интерпретируется в рамках данной статьи как задача максимизации количества МСИ в единицу времени (задача на быстроедействие) при минимизации времени сеансов на передачу данных с учетом существующих технических ограничений.

1. Формализация задачи планирования и обработки измерений. Итак, рассматривается созвездие НКА ГЛОНАСС в составе штатной группировки из 24 аппаратов, каждый из которых оснащен АС МСИ одного типа. Параметры данного созвездия на этапе решения описываемой задачи восстанавливаются из файлов `sp3` [17, 18] с высокоточной эфемеридной информацией, поставляемых в том числе службой “Система высокоточного определения эфемеридно-временной информации” [19]. Дополнительно в сценариях исследования предполагается существование созвездия из шести аппаратов ГЛОНАСС ВОС, также оснащенных АС МСИ, но по умолчанию отличной от той, которая используется на борту НКА среднеорбитального сегмента. При этом параметры данного созвездия формируются путем высокоточного моделирования на основе интегрирования полных дифференциальных уравнений движения НКА [20, 21].

Предполагается, что АС МСИ функционирует на одной частоте с постоянным периодом L секунд [13, 14], из которых K секунд выделяется на отправку, а L – на прием навигационной информации в виде сигналов от других видимых НКА. Скорость передачи $\omega_{\text{СВС}}$ и среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки измерения дальности $\sigma_{\text{СВС}}$ предполагаются заданными.

Далее будем полагать, что АС МСИ и аппаратура передачи информации на борту НКА ВОС функционируют в непрерывном режиме на различных частотах. Скорость передачи информации $\omega_{\text{ВОС}}$ и СКО ошибки $\sigma_{\text{ВОС}}$ заданы в некотором диапазоне значений.

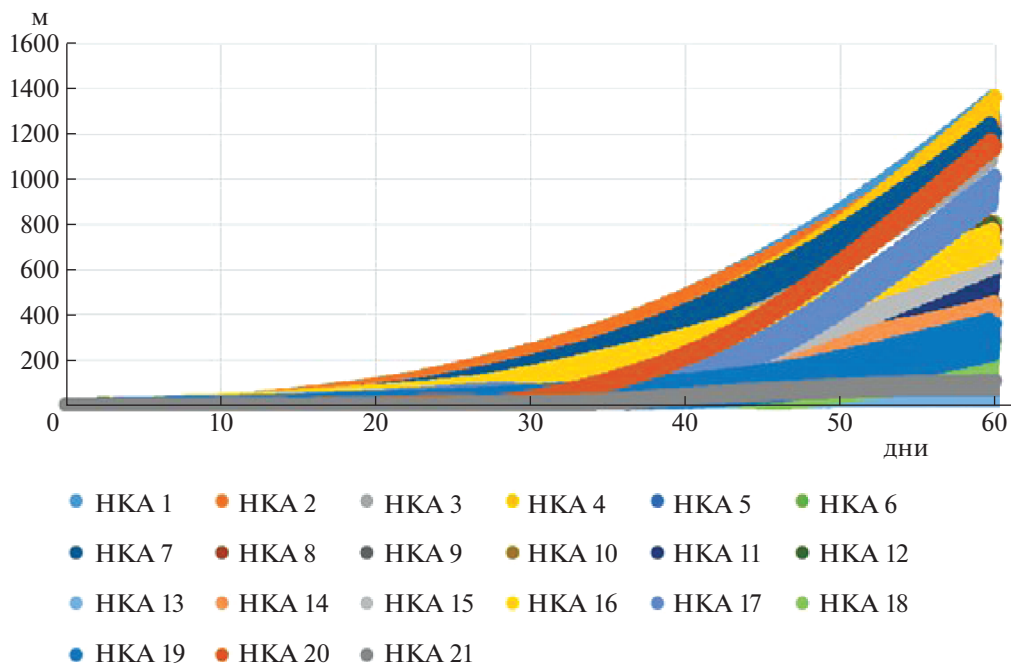


Рис. 1. Ошибки прогнозирования эфемерид

Предполагаемые характеристики АС МСИ и обмена информацией между сегментами орбитальных группировок (ОГ) также заданы в некотором диапазоне значений.

Существующие ограничения на организацию сеансов помимо очевидной проверки видимости и исключения влияния атмосферы учитывают также ограничения на максимальную дальность $\{D_{\max\text{ВОС}}, D_{\max\text{СВС}}, D_{\max\text{ВОС-СВС}}\}$ между НКА при организации парного сеанса, обусловленную требованиями по энергетике, а также взаимное угловое положение НКА относительно Земли, обусловленное требованиями по диаграмме направленности антенн $\{\alpha_{\min/\max\text{ВОС}}, \alpha_{\min/\max\text{СВС}}, \alpha_{\min/\max\text{ВОС-СВС}}\}$.

Таким образом, с учетом принятой здесь интерпретации задачи уточнения эфемерид необходимо минимизировать суммарное время обмена информацией в парных сеансах по всем созвездиям с целью передачи такого объема данных, который был бы достаточен для формирования оценок эфемерид НКА с требуемой точностью.

Одновременно существуют также дополнительные требования к искомому решению, такие, как необходимость “замыкания” полного созвездия средне- и высокоорбитального сегментов (СВС и ВОС) парными измерениями. Иными словами, для каждой пары НКА–НКА в обоих ОГ должны быть доступны как “прямое”, так и “встречное” измерения, поскольку в таком случае в результате обмена формируемыми измерениями между этими НКА удастся устранить ошибку “ухода” бортовых часов. Кроме того, поскольку три компонента вектора состояния НКА для созвездия остаются ненаблюдаемыми [13, 14], условием решения задачи является накопление нужного числа измерений по всем НКА всех рассматриваемых созвездий. Дело в том, что результирующая ошибка эфемерид определяется как среднее всех получаемых по результатам обработки измерений ошибок оценок эфемерид для всех ОГ. Представление относительно требуемого уровня ошибок эфемерид, к которому нужно стремиться путем оптимизации процедуры планирования и обработки измерений, может быть сформировано на основе анализа рис. 1–3.

На рис. 1 представлена эволюция ошибок прогноза эфемерид НКА. Заметен существенный разброс ошибок для различных НКА, обусловленный разным влиянием неконтролируемых факторов. На рис. 2 рассмотрена эволюция ошибок эфемерид с учетом их уточнения по трем так называемым полным измерениям (здесь под “полным” измерением понимаем одно запросное

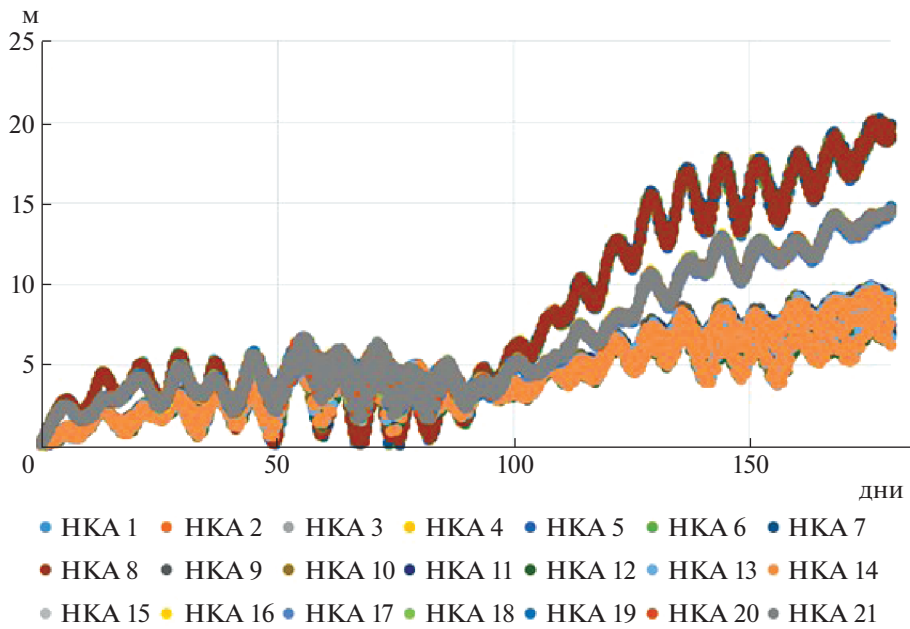


Рис. 2. Ошибки уточнения эфемерид, полученные при обработке трех полных измерений

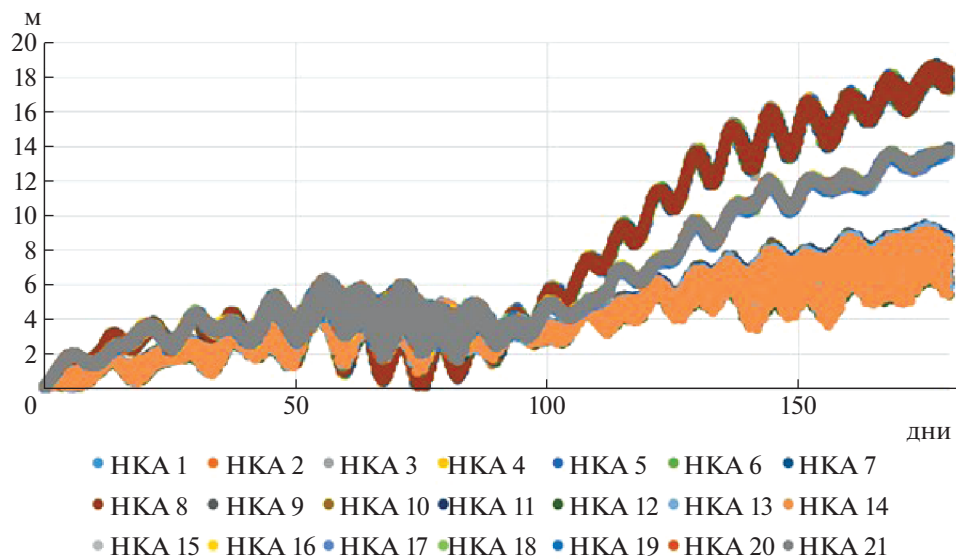


Рис. 3. Ошибки уточнения эфемерид, полученные при обработке четырех полных измерений

измерение по каждой паре НКА, т.е. $(N + M) \cdot (N + M - 1) / 2$ отдельных беззапросных измерений за половину суток), где $M = 24$ и $N = 6$. Наконец, на рис. 3 показано то же самое, но с учетом обработки шести полных измерений. Обработка менее трех измерений приводит к расходимости результатов. На всех рисунках ошибки приведены в метрах в зависимости от дней эксперимента. Почти не заметна разница в уровне получаемой точности, которая составляет для варианта трех измерений через 90 дней функционирования ОГ порядка 5 м максимальной ошибки, а для варианта шести измерений – около 4 м. Также на примере обработки трех и шести измерений пока-

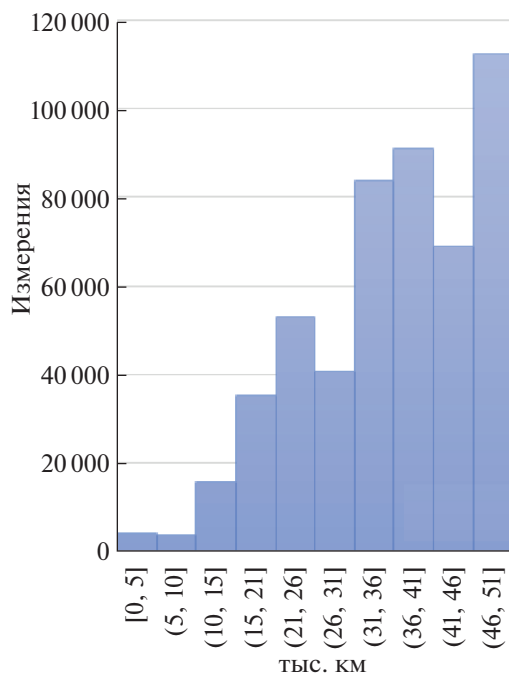


Рис. 4. Гистограмма взаимных дальностей внутри ОГ СВС ГЛОНАСС

зано, что дальнейшее повышение их числа не приводит к заметным улучшениям получаемой точности. Сказанное актуально для СКО уровня шума в канале измерений порядка 10 см.

Таким образом, обсуждаемая техническая задача характеризуется высокой размерностью подлежащих оптимизации параметров и требует учета существенного множества ограничений. При этом некоторые из этих ограничений могут интерпретироваться как оптимизируемые параметры вследствие того, что их значения не определены на текущий момент и, более того, могут варьироваться по результатам точности оценок эфемерид. Так как решение подобной задачи в аналитической форме практически невозможно, то авторами был выбран способ, состоящий в анализе возможных вариантов ее решения с их последующим полным перебором с учетом технических ограничений. В пользу такого достаточно простого подхода говорят свойства изо-маршрутности орбит НКА ГЛОНАСС СВС и геосинхронности орбит НКА ГЛОНАСС ВОС, для которых скорость прецессии орбит крайне мала. Иными словами, в первом случае орбиты всех НКА являются полностью повторяющимися, а во втором — стабильными относительно Земли и околоземных объектов. Следовательно, выбор восьмисуточного интервала для исследования закрывает вопрос повторения условий проведения эксперимента и упрощает решение поставленной задачи, позволяя масштабировать полученный результат на все остальные рабочие циклы функционирования рассматриваемых космических группировок.

Конечной целью перебора является определение таких условий взаимодействия с точки зрения генерации и обработки МСИ, при которых достигается требуемая точность оценок эфемерид КА за счет накопления нужного числа измерений в созвездиях СВС и ВОС, найденного выше путем моделирования.

2. Исходные данные задачи и анализ влияния ограничений. Рассмотрим исходные данные, определяющие основные условия решения задачи, в том числе условия видимости внутри и между ОГ СВС и ВОС с точки зрения ограничений на дальности и углы взаимного визирования. Напомним, что достаточно жесткими выступают ограничения по дальности абонентов СВС–СВС. Остальные ограничения являются варьируемыми и разбиваются при этом на допустимые и нежелательные. В силу вероятностной картины обсуждаемых феноменов, определяемых огромным количеством неконтролируемых факторов, наиболее адекватным способом представления

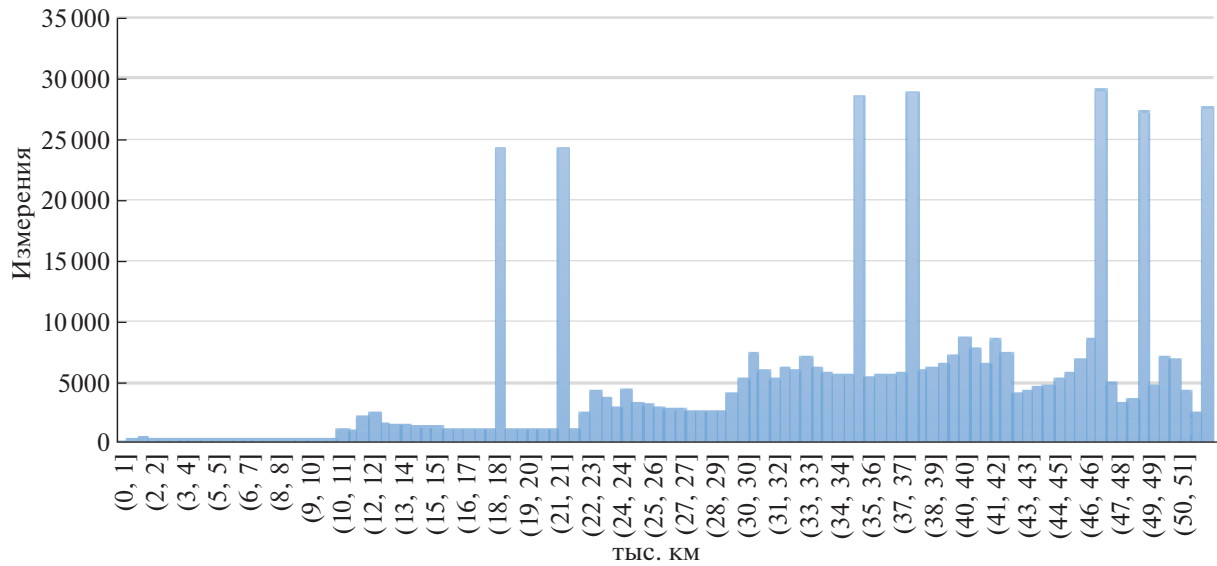


Рис. 5. Расширенная гистограмма взаимных дальностей внутри ОГ СВС ГЛОНАСС

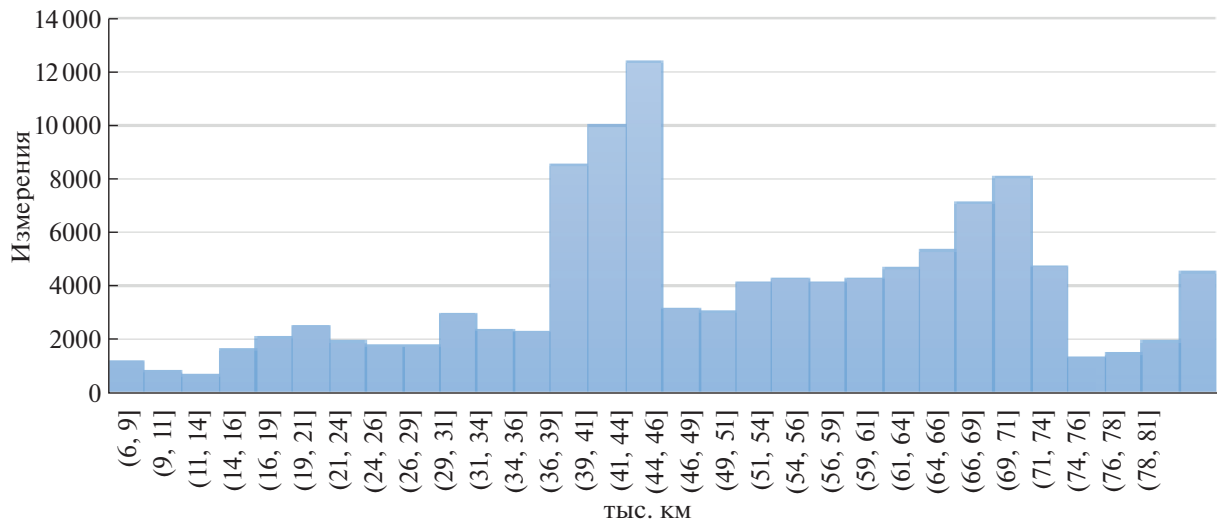


Рис. 6. Расширенная гистограмма взаимных дальностей внутри ОГ ВОС ГЛОНАСС

результатов анализа будет использование гистограмм анализируемых параметров, полученных путем моделирования соответствующих процессов на восьмисуточном интервале (рис. 4).

В связи с ограничением на максимальную дальность порядка 40 тыс. км вследствие применения на борту существующих НКА антенн с круговой диаграммой направленности, для которых как бы взаимные углы визирования между абонентами не важны, но максимальная дальность при этом снижается до обозначенного уровня, как видно, значительная часть сеансов отсекается. Это обстоятельство учитывалось авторами при проведении экспериментов. Наличие на гистограмме рис. 5 пиков объясняется изомаршрутностью и стабильностью конфигурации ОГ СВС ГЛОНАСС.

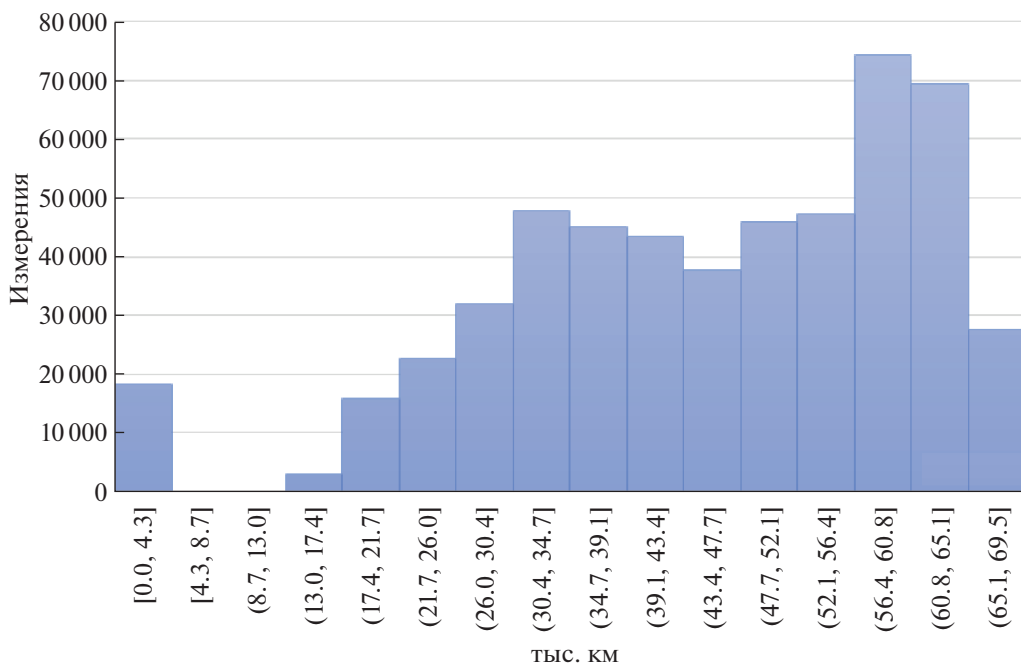


Рис. 7. Гистограмма взаимных дальностей между ОГ СВС и одним НКА ВОС ГЛОНАСС

Таким образом, можно констатировать, что накопление измерений может быть проведено достаточно быстро независимо от времени суток лишь для некоторых пар НКА.

Применительно к ВОС диапазон взаимных дальностей в отличие от СВС варьируется в очень широких пределах (рис. 6) и не имеет ярко выраженных отдельно стоящих пиков. Этот диапазон также весьма широк применительно к взаимодействию между группировками (одного НКА ВОС и СВС на рис. 7).

В результате “отсечение” значений дальностей свыше 40 тыс. км приведет к потере значительного количества потенциально возможных измерений и, как показали эксперименты, не позволит накопить их в достаточном количестве для проведения процедуры уточнения эфемерид с требуемым результатом. В этой связи ниже обсуждается вариант использования бортовой антенны с приемлемой по энергетике ширине диаграммы направленности, которая должна обеспечивать прием в нужном диапазоне углов визирования.

Анализ гистограмм на рис 8, 9 показывает, что при проведении большей части измерений внутри ВОС углы визирования принадлежат достаточно широкому диапазону (от 30 до 70°), а

Таблица. Процент времени видимости абонента с использованием АС МСИ на ВОС

Пара КА	Ограничение по дальности, тыс. км			
	40	50	60	70
	Процент времени сеанса			
1–2	46	100	100	100
1–3	32	46	62	93
1–4	0	13	38	58
1–5	39	52	70	100
1–6	40	53	71	100

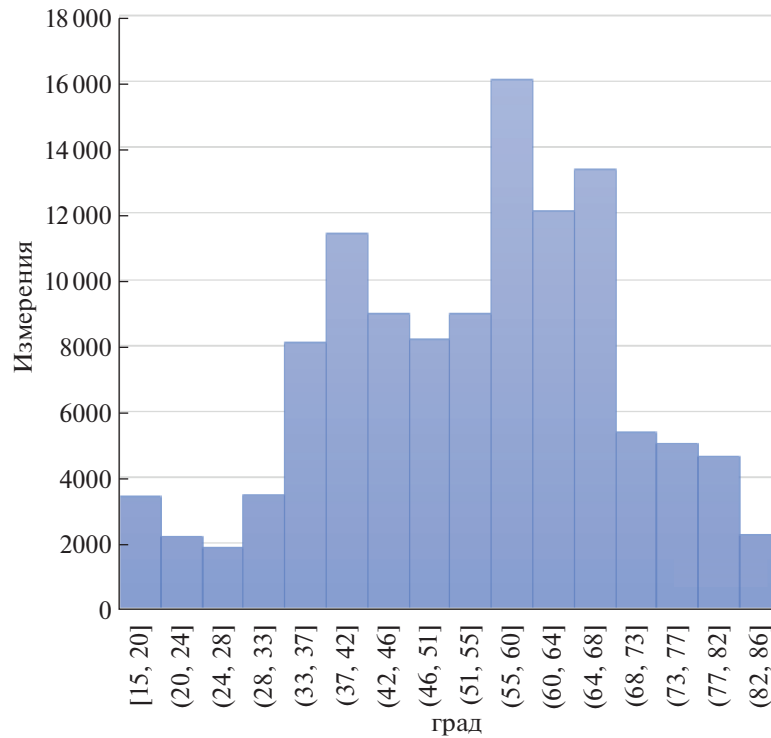


Рис. 8. Гистограмма углов визирования абонентов внутри ОГ ВОС ГЛОНАСС

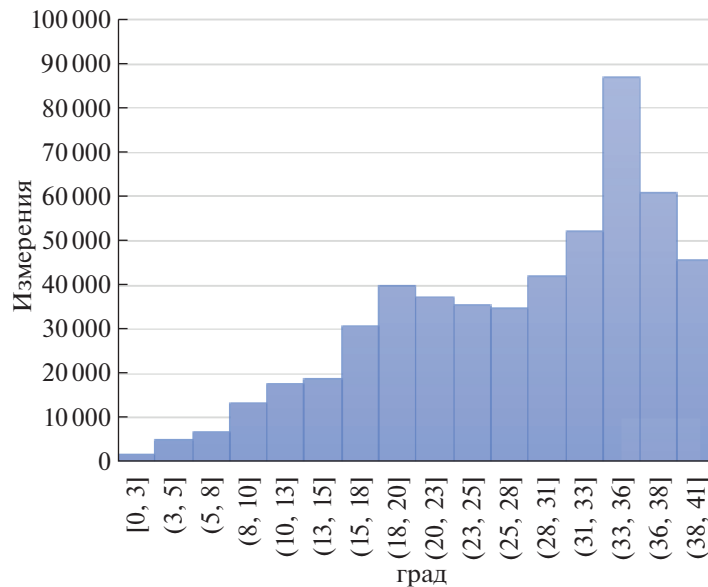


Рис. 9. Гистограмма углов визирования спутниками ВОС спутников ОГ СВС ГЛОНАСС

при проведении сеансов ВОС–СВС диапазон этих углов (от 10 до 40°) существенно отличается от используемого внутри созвездия ВОС. Это обстоятельство приводит к необходимости либо переключения усиления антенны в нужном направлении и применения антенны с фазированной антенной решеткой (АФАР), либо размещения двух различных антенн. В противном случае

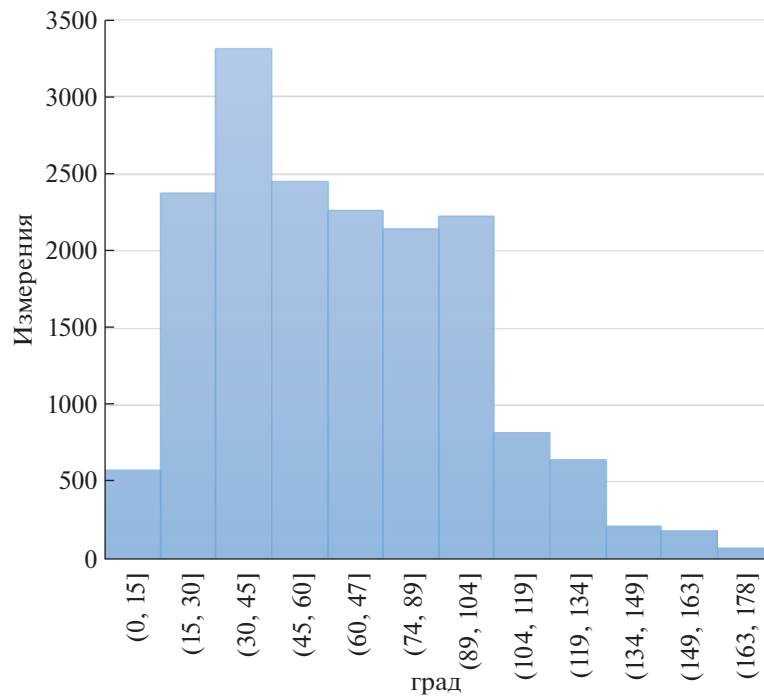


Рис. 10. Гистограмма углов визирования спутников ВОС спутниками ОГ СВС ГЛОНАСС

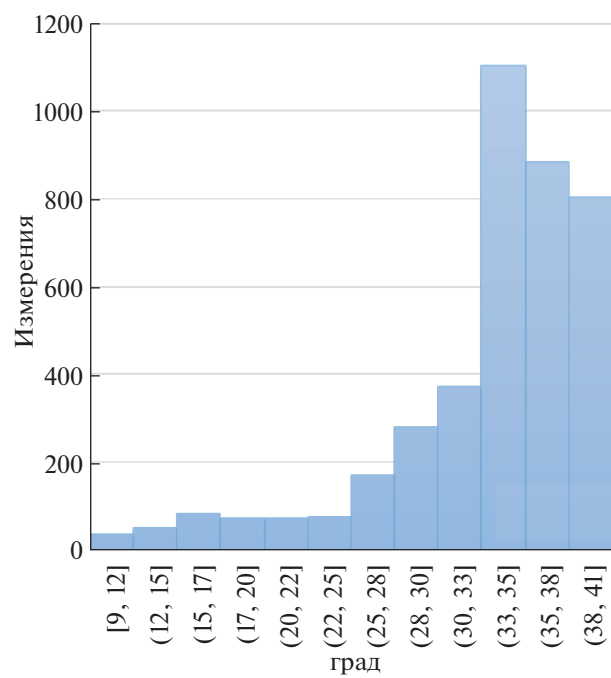


Рис. 11. Гистограмма углов визирования спутников ВОС спутниками ОГ СВС ГЛОНАСС при использовании антенны, направленной от Земли

“отсечение” потенциально возможных измерений будет производиться или по дальности, или по углам, в результате чего группировка ВОС фактически будет “отрезана” от СВС, а обмен данными внутри ВОС существенно затруднится. При проведении численных экспериментов обсуждаемые ограничения варьировались по дальностям и углам. При этом была получена оценка (в процентах) времени возможной организации сеансов взаимных измерений в зависимости от ограничений по дальности (см. таблицу).

Рассмотрим теперь условия работы НКА СВС при взаимодействии между группировками. Анализ гистограммы на рис. 10 показывает, что, несмотря на использование антенны с круговой диаграммой направленности, часть измерений от сегмента ВОС не может быть принята, так как для их приема на НКА СВС необходимо разместить антенну, направленную в сторону от Земли. Приведенная далее гистограмма (рис. 11) позволяет дать оценку числа “потерянных” потенциально возможных измерений при определенных углах визирования.

Согласно анализу соответствующей гистограммы (рис. 11), при отсутствии дополнительной антенны на СВС “отсекается” лишь правая часть диапазона, представленного на гистограмме на рис. 9, незначительно сужая исходный диапазон до 10–33°, т.е. по сути при первом рассмотрении не являясь обязательным элементом системы.

3. Результаты перебора и возможные варианты технических решений. Как уже указывалось, приведенные в предыдущем подразделе статьи гистограммы получены путем проведения численных экспериментов с использованием специально разработанного программного обеспечения. На основе анализа этих данных были выбраны допустимые интервалы перечисленных ниже параметров с целью их перебора в процессе проведения экспериментов:

максимальная дальность для проведения сеансов МСИ внутри созвездия ВОС в диапазоне от 40 до 80 тыс. км;

максимальная дальность проведения сеансов МСИ между созвездиями ВОС и СВС в диапазоне от 40 до 70 тыс. км;

ширина диаграммы направленности передающей антенны ВОС и СВС для работы с ВОС от 5 до 45° с усилением для соответствующей дальности;

рабочий диапазон диаграммы направленности антенны ВОС и СВС для работы с ВОС от 10 до 70°;

максимальная дальность проведения сеансов МСИ внутри созвездия СВС до 40 тыс. км;

круговая диаграмма направленности антенны для работы внутри созвездия СВС.

Согласно объективно существующей необходимости упрощения реализации соответствующих технических решений, в процессе перебора преследовалась цель минимизировать требования к дальности и диапазону рабочих углов диаграммы направленности антенн. С учетом предложенных диапазонов было проведено моделирование процессов проведения сеансов измерений и их обработки с целью накопления нужного количества измерений (от трех полных измерений за виток) в имеющихся технических ограничениях. Детальный анализ результатов экспериментов показал, что не существует множества пересекающихся областей значений варьируемых параметров, для которых имеющиеся технические ограничения удовлетворяются одновременно.

Поясним на конкретных примерах. Так, для обмена данными внутри созвездия ВОС с минимальными требованиями по дальности (до 50 тыс. км) обеспечиваются условия регулярного взаимодействия на значительных углах визирования – от 50 до 60° с помощью узконаправленной тороидальной диаграммы антенны с узкими лепестками. Однако при использовании такой антенны сеансы МСИ и обмена данными между ВОС и СВС вообще не происходит. Возможность обмена между ВОС и СВС в некоторые моменты времени появляется при снижении диапазона углов антенны ВОС до 40–50°. Это приводит к потере сеансов между номерами 1 и 2 НКА ВОС при требовании увеличить максимальную дальность приема-передачи до 60 тыс. км. Дальнейшее снижение диапазона углов ВОС до 30–40° вызывает в том числе уменьшение частоты сеансов между всеми парами ВОС и повышает требование к дальности до 70 тыс. км, позволяя, однако, установить стабильные сеансы с КА СВС. Тем не менее, доступных на витке сеансов ВОС–ВОС при этом достаточно для сбора необходимого количества измерений в интересах их обра-

ботки с целью уточнения эфемерид КА ВОС, что одновременно снижает возможности передачи значительного объема данных от других целевых нагрузок.

Заметим, что снижение диапазона углов ВОС менее 30° приводит к отсутствию стабильных сеансов между парами и “замыкание” созвездия возможно лишь через промежуточных абонентов, например 1–4; 4–5; 5–2 и т.д. Одновременно требования к дальности поднимаются до 80 тыс. км и появляются стабильные сеансы взаимодействия с СВС, ранее недоступные вследствие ограничений по дальности, углам визирования или геометрии взаимного расположения.

Подводя итоги сказанному, можно утверждать, что поставленная исходно задача на “быстродействие” решается лишь при условии выполнения жестких технических требований к бортовым аппаратным средствам. В связи с этим представляется целесообразным сформировать множество наиболее вероятных сценариев обмена данными с точки зрения наиболее приемлемых для реализации параметров бортовых аппаратных средств НКА. При этом были использованы следующие основные допущения:

обсуждаемые перспективные аппаратные средства МСИ имеют условно круговую диаграмму направленности с ограничением по дальности приема-передачи до 40 тыс км;

наибольший интерес представляет организация обмена данными между элементами ВОС, для чего, по-видимому, должна быть разработана аппаратура, обеспечивающая максимальное количество сеансов внутри этой группировки;

вновь разрабатываемая аппаратура для обеспечения сеансов обмена между ВОС и СВС будет унифицирована;

преодоление всех перечисленных выше технических ограничений возможно в случае использования АФАР, обеспечивающей упрощение организации сеансов внутри и между группировками КА ВОС и СВС.

Таким образом, возможно полное и регулярное взаимодействие ОГ с целью формирования и обмена МСИ для уточнения эфемерид до требуемого уровня:

с помощью обсуждаемых перспективных аппаратных средств для обмена данными внутри группировки СВС;

антенны с диаграммой от 30 до 45° ($\alpha_{\min/\max\text{ВОС}}$, $\alpha_{\min/\max\text{ВОС-СВС}}$) с дальностью до 65 тыс. км ($D_{\max\text{ВОС}}$, $D_{\max\text{ВОС-СВС}}$) либо с диаграммой от 30 до 40° с максимальной дальностью до 70 тыс. км для обмена внутри группировки ВОС и одновременно для приема-передачи с ВОС на СВС;

антенны с диаграммой в диапазоне $60-70^\circ$ ($\alpha_{\min/\max\text{СВС-ВОС}}$) либо $70-80^\circ$ (инвариантно) с максимальной дальностью до 65 тыс. км ($D_{\max\text{СВС-ВОС}}$) для КА СВС при взаимодействии с ВОС.

Альтернативным вариантом может быть установка направленной антенны с диаграммой от 25 до 45° с максимальной дальностью до 65 тыс. км, с помощью которой будут организованы сеансы связи и внутри ВОС, и между ВОС и СВС.

Представленные варианты конфигурации позволили организовать требуемое число сеансов МСИ с целью их последующей обработки и получения оценок эфемерид нужной точности.

Заключение. Предложено предварительное решение технической задачи уточнения эфемерид НКА существующего средневысотного сегмента ГЛОНАСС и перспективного ВОС в интересах совершенствования потребительских характеристик ГЛОНАСС и повышения автономности функционирования входящих в ее состав группировок НКА. Полученное решение включает информационную технологию организации сеансов проведения и обработки МСИ, обеспечивающую требуемую точность эфемерид в условиях соблюдения ряда технических ограничений. Одновременно проведен анализ влияния ключевых параметров перспективной бортовой аппаратуры МСИ на количество сеансов измерений, включая ограничения по максимальной дальности и диапазону углов приема-передачи навигационных сообщений и формируемых измерений, а также развит подход к определению требований к аппаратным средствам на основе перебора возможных вариантов их характеристик с учетом планирования всех сеансов ВОС–ВОС, ВОС–СВС и СВС–СВС.

С целью подтверждения эффективности предлагаемых технических решений проведены эксперименты на базе реальных и частично моделируемых данных, которые позволили уточнить требуемый объем аккумулируемых навигационных измерений и соответствующий уровень точ-

ности эфемерид, а также минимальные требования к характеристикам аппаратуры МСИ по каждому из типов аппаратов, необходимый для его достижения.

Авторы полагают, что развитый в данной статье подход к решению проблемы совершенствования потребительских характеристик ГЛОНАСС и снижения зависимости от загрузки данных с Земли для входящих в ее состав группировок НКА может составить основу комплексной технологии по дальнейшему совершенствованию ГЛОНАСС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kruzhkov D.M., Pasyukov V.V.* High-Accuracy Navigation Based on Informational GNSS Technologies. P. II. GLONASS – Information Technologies and Navigation Tasks Solving Algorithms. M.: Moscow Aviation Institute, 2021.
2. *Kruzhkov D.M., Pasyukov V.V.* National Global Navigation Satellite System GLONASS: Features of Creation, Development and Use. M.: Moscow Aviation Institute, 2022.
3. *Bartenev V.A., Grechkoseev A.K., Kozorez D.A., Krasilchshikov M.N., Pasyukov V.V., Sebryakov G.G., Syalo K.I.* Modern and Future Informational GNSS Technologies in High-Precision Navigation Tasks. M.: Fizmatlit. 2014.
4. GLONASS Information Analytics Center. <https://glonass-iac.ru/>, 10.12.2022.
5. *Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M.* On the Issue of Autonomous Refining of the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft. Analysis of the Possibilities of Developed Information Technology // *Cosmic Research*. 2021. V. 59. № 5. P. 357–365.
6. *Grechkoseev A.K., Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M., Mararescul T.A.* Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft Concept and Information Technologies // *J. Computer and Systems Sciences International*. 2020. V. 59. № 4. P. 598–608.
7. International Earth Rotation Service. https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html, 10.12.2022.
8. *Yuguo Y., Wenfeng N., Tianhe X., Zhenlong F., Huijie X., Zhangzhen S.* Earth Orientation Parameters Prediction Based on the Hybrid SSA + LS + SVM Model. *Measurement Science and Technology*. 2022. V. 33. № 12.
9. *Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M., Pasyukov V.V.* Current Problems of Improving the Coordinate-Time Support of GLONASS and Promising Methods for Their Solution. 1. Alignment of Coordinate Systems Used by Various Information Technologies to Refine the Geocenter's Position // *J. Computer and Systems Sciences International*. 2019. V. 58. № 4. P. 648–657.
10. *Montenbruck O., Steigenberger P., Aicher M.* A Long-Term Broadcast Ephemeris Model for Extended Operation of GNSS Satellites // *J. of the Institute of Navigation*. 2020. V. 68. № 5.
11. *Chen W., Jing G., Qile Z., Maorong G.* Improving the Orbits of the BDS-2 IGSO and MEO Satellites with Compensating Thermal Radiation Pressure Parameters // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 3. P. 641.
12. *Krasilchshikov M.N., Sebryakov G.G.* Modern Information Technologies in the Navigation and Guidance Tasks of Unmanned Maneuverable Aircraft. M.: Fizmatlit. 2009.
13. *Grechkoseev A.K.* Study of Observability of Motion of an Orbital Group of Navigation Space System Using Intersatellite Range Measurements. I // *J. Computer and Systems Sciences International*. 2011. V. 50. № 2. P. 293–308.
14. *Grechkoseev A.K.* Study Of Observability Of Motion of an Orbital Group of Navigation Space System Using Intersatellite Range Measurements. II // *J. Computer and Systems Sciences International*. 2011. V. 50. № 3. P. 472–482.
15. *Chen W., Qile Z., Jing G., Jingan L., Gucang C.* The Contribution of Intersatellite Links to BDS-3 Orbit Determination: Model Refinement and Comparisons // *J. of the Institute of Navigation*. 2019. V. 66. № 1. P. 71–82.
16. *Zhao X., Jinhua L., Shanshi Z., Xiaojie L., Qiuli C., Gong Z., Haihong W.* Research on the Enhancement of BDS-3 Constellation Orbit Determination and ERP by Inter-satellite Link. *China Satellite Navigation Conf. (CSNC 2022) Proceedings*. China, Pekin, 2022.
17. *Akimov E.V., Kruzhkov D.M., Yakimenko V.A.* High-Precision Simulation of Onboard Signal Receivers in Global Navigation Systems // *Russian Engineering Research*. 2020. V. 40. № 2. P. 152–155.

18. *Akimov E.V., KruzHKov D.M., Yakimenko V.A.* Prototype Information System for High-Precision Navigation in Global Satellite Systems // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. № 2. P. 156–159.
19. *SVOEVP*. <http://www.glonass-svoevp.ru/index.php?lang=ru>, 10.12.2022.
20. *Vallado D.A.* Fundamentals of Astrodynamics and Applications. Portland: Microcosm Press, 2022. P. 1122.
21. *KruzHKov D.M., Pasyukov V.V.* High-Accuracy Navigation Based on Informational GNSS Technologies. P. I. Mathematical Basis. M.: Moscow Aviation Institute, 2021.