

РОССИЙСКАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА И ЕЁ ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2024 г. Н.А. Тестоедов^{а,*}

^аИнститут космических технологий Красноярского научного центра СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: priem@ist.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.02.2024 г.

После доработки 12.02.2024 г.

Принята к публикации 15.03.2024 г.

Глобальные навигационные спутниковые системы, включая российскую ГЛОНАСС, стали неотъемлемой частью жизни общества. В статье рассматриваются основные принципы навигации, состав космического комплекса, погрешности определения положения потребителя и методы повышения важнейших характеристик системы, в первую очередь точности. Особое внимание уделено состоянию и развитию орбитальной группировки системы ГЛОНАСС как ключевого её звена и повышению помехоустойчивости, критичной для любой спутниковой системы двойного назначения, приведены принципы создания интегрированных инерциальных навигационных систем. Сформулированы предложения по парированию угроз, касающихся координатно-временного и навигационного обеспечения, путём создания консорциума стран БРИКС.

Статья подготовлена на основе доклада, представленного на научной сессии Общего собрания членов РАН 12 декабря 2023 г.

Ключевые слова: космические аппараты, координатно-временное и навигационное обеспечение, глобальная навигационная спутниковая система, псевдодальность, дифференциальные системы.

DOI: 10.31857/S0869587324030043, EDN: GGZWDS

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) создавалась и развивается усилиями большого коллектива учёных Российской академии наук и специалистов предприятий промышленности, научно-исследовательских институтов госкорпорации “Роскосмос”, Министерства обороны РФ. В ней реализованы самые передовые технологии мирового уровня. С учётом масштабов и эффективности результатов функционирования, позитивного влияния на разные сферы её без преувеличения можно отнести к национальному достоянию Российской Федерации.



ТЕСТОЕДОВ Николай Алексеевич — академик РАН, заместитель председателя СО РАН, директор ИКТ КНЦ СО РАН.

Основное назначение системы, полностью развёрнутой в 1995 г., — решение задач обеспечения обороны и безопасности страны. С 1999 г. указом Президента Российской Федерации ГЛОНАСС получила статус двойного назначения. С 2007 г. гражданские услуги системы предоставляются потребителям всего мира на безвозмездной основе [1].

Гражданские услуги ГЛОНАСС, совместно с другими глобальными навигационными спутниковыми системами, массово внедрены в навигационные устройства всех российских и практически всех зарубежных производителей навигационного оборудования и используются на транспорте, в системах передачи данных, в электросетях, при разведке и разработке месторождений полезных ископаемых. Особое значение приобретает применение ГЛОНАСС в совершенствовании навигации по Северному морскому пути, разработке месторождений на шельфе в открытом морском пространстве. Спутниковые навигационные технологии значительно повышают эффективность фундаментальных научных исследований в геодинاميке, гравиметрии, сейсмике, изучении поведения ионосферы и тропосферы Земли (ГЛОНАСС начала применяться для

решения этих научных задач с начала 1990-х годов, ещё до своего полного развёртывания).

В свою очередь, создание и развитие космической навигационной системы невозможно без участия академических организаций. Без точного определения параметров вращения и ориентации Земли, уточнения моделей её гравитационного поля, учёта поправок, базирующихся на общей и частной теории относительности, невозможно обеспечить корректный расчёт орбиты спутников.

Существующая орбитальная группировка космического комплекса ГЛОНАСС состоит из 24 спутников на средней круговой орбите высотой 19 100 км и включает в себя три модификации навигационных спутников “Глонасс” (запуски первых из них были осуществлены в 2003, 2011 и 2023 гг.) Эти многофункциональные космические аппараты обеспечивают, помимо излучения навигационного сигнала, реализацию ряда других задач (рис. 1).

Принцип космической навигации — решение триангуляционной¹ задачи относительно известного положения навигационных космических аппаратов в количестве не менее четырёх [2]. Навигационная аппаратура потребителей рассчитывает расстояния до спутников путём умножения скорости света на разницу времени излучения навигационного сигнала со спутника и времени его приёма.

При кажущейся простоте решаемой задачи следует учесть, что спутники “Глонасс” летят на высоте 19 100 км со скоростью почти 4 км/сек и точность знаний о положении спутника должна быть одного уровня с требованиями к точности навигации потребителя. Поэтому ГЛОНАСС — это сложная система технических и программных средств, включающая в себя подсистемы научного фундаментального обеспечения, космический комплекс, потребительские сегменты как гражданские, так и спецпотребителей, функциональные дополнения, повышающие потребительские характеристики (рис. 2). Географически система разнесена по всему миру, включая четыре измерительные станции в Антарктиде.

Космическая радионавигация имеет достаточно много параметров, но если рассматривать их с позиций потребителя, то ключевые из них — точность местоопределения, доступность в любой точке Земли, целостность, заключающаяся в подтверждении достоверности сигналов, и помехозащищённость [3].

Почему радионавигация вне зависимости от системы (российская ГЛОНАСС, североамериканская GPS, европейская Galileo, китайская BeiDou) не абсолютно точна? В соответствии с законами Кеплера [3] траектория движения небесных тел в центральном поле тяготения в отсутствие внешних воздействий рассчитывается точно. Но в реальных услови-

ях на космический аппарат, вращающийся вокруг Земли, действуют разнообразные внешние силы, вносящие погрешности в определение псевдодальности². Такая погрешность определяется как сумма частных погрешностей, которые объясняются влиянием ионосферы, тропосферы, многолучёвости распространения сигнала, релятивистских и гравитационных эффектов. В этом же перечне и погрешности, вносимые бортовой аппаратурой спутника и наземной аппаратурой потребителя (рис. 3) [2].

Отдельно выделена погрешность, объясняемая разницей шкал времени спутника и аппаратуры потребителя, так как шкала времени спутника корректируется при каждой закладке обновляемого навигационного сообщения (для спутников “Глонасс” — один раз за виток, то есть каждые 12 часов). Описанные виды погрешностей вносят разные значения в суммарную погрешность, указанную на рисунке 3. Здесь же видно, что в результате мероприятий по повышению характеристик спутников, средств наземного комплекса управления, методик и программного обеспечения расчётов эфемерно-временной информации погрешность местоопределения потребителя за 10 лет снижена в 2 раза.

Точность навигационных систем неразрывно связана с характеристикой доступности, то есть возможностью непрерывного наблюдения такого количества спутников, которое достаточно для решения навигационной задачи. При наличии полного состава орбитальной группировки ГЛОНАСС количество спутников в зоне видимости потребителя составляет в среднем 6–10 аппаратов в зависимости от расположения потребителя на поверхности земного шара. При этом доступность достигает 99.99% (по сути это время, когда потребитель с вероятностью 95% без дополнительных корректирующих систем определяет своё положение).

Точность системы ГЛОНАСС в первую очередь определяется точностью космического комплекса, то есть точностью навигационного сигнала, излучаемого космическим аппаратом. Восстановление в период с 2003 по 2011 г. полной орбитальной группировки (24 спутника) повысило точность космического комплекса более чем в 10 раз, уменьшив погрешность определения псевдодальности с 15 м до 1.4 м. Дальнейшее уменьшение погрешности (в настоящее время она составляет 1.2 м) достигается значительно медленнее, его удаётся добиться благодаря улучшению характеристик бортовой аппаратуры и созданию новых технологий управления.

Основной вклад в повышение степени точности создаваемого радионавигационного поля может внести обеспечение более высокой стабильности бортового синхронизирующего устройства, проще

¹ Триангуляция — геодезическое построение на местности системы пунктов, образующих треугольники, у которых измеряются все углы и длины некоторых базовых сторон.

² Псевдодальность — это расстояние между спутником и навигационной аппаратурой потребителя, включающее в себя помимо собственно дальности погрешность из-за разности времени в часах спутника и аппаратуры потребителя.

говоря, бортовых часов спутника. Переход от атомных стандартов частоты на основе цезия к водородным снижает нестабильность на суточном интервале в 20 раз — с 1×10^{-13} до 5×10^{-15} . Соответственно, в этой же степени уменьшается погрешность навигации от расхождения шкал бортовых часов спутника и на-

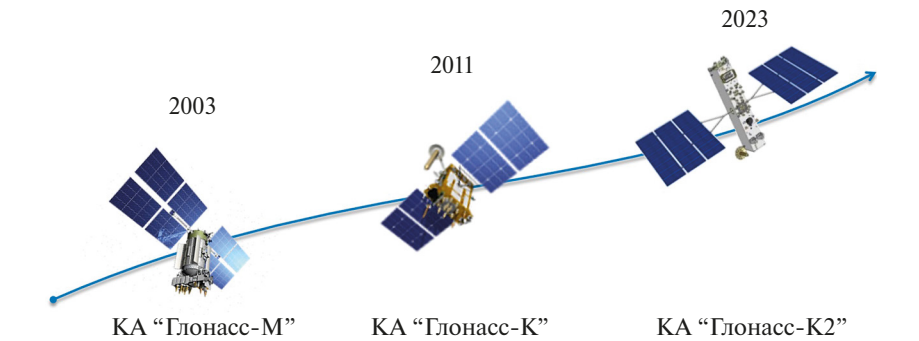


Рис. 1. Действующая орбитальная группировка космического комплекса ГЛОНАСС

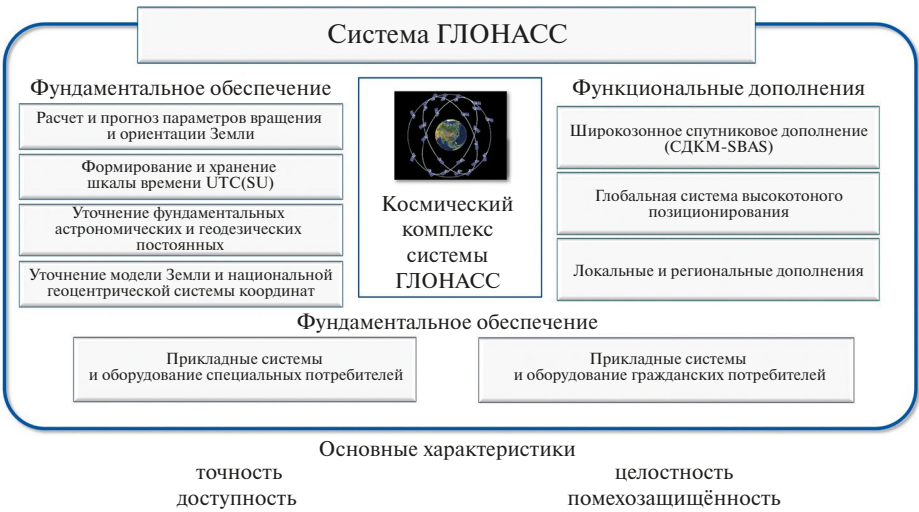


Рис. 2. Построение системы ГЛОНАСС

$$\delta\check{D} = \delta t_{\text{ион}}c + \delta t_{\text{троп}}c + \delta t_{\text{млр}}c + \delta t_{\text{ргэ}}c + \delta t_{\text{пр}}c + \delta t_{\text{ап}}c + \varepsilon_{\check{d}} + \delta t_{\text{бшв}}c$$

- $\delta t_{\text{ион}}c$ — ионосферная погрешность;
- $\delta t_{\text{троп}}c$ — тропосферная погрешность;
- $\delta t_{\text{млр}}c$ — погрешность многолучевого распространения;
- $\delta t_{\text{ргэ}}c$ — погрешность от релятивистских и гравитационных эффектов;
- $\delta t_{\text{пр}}c$ — погрешность, вносимая навигационным приёмником;
- $\delta t_{\text{ап}}c$ — погрешность, создаваемая бортовой аппаратурой;
- $\varepsilon_{\check{d}}$ — прочие погрешности;
- $\delta t_{\text{бшв}}c$ — погрешность бортовой шкалы времени.

Источник погрешности	Изменение бюджета погрешности определения псевдодалности $\sigma_{\text{д.м.}}$	
	2009 г.	2019 г.
Часы спутника	2.0	0.7
Ионосфера	4.0	2.0
Тропосфера	0.5	0.2
Многолучёвость	2.5	0.5
Приёмник	1.5	0.5
Прочие	2.0	1.0
Суммарная погрешность	5.7	2.8

Рис. 3. Погрешность определения псевдодалности

земного эталона в общем бюджете погрешностей. Наземный эталон имеет суточную нестабильность 1×10^{-16} , однако результаты работ под руководством научного руководителя Института лазерной физики СО РАН академика РАН С.Н. Багаева показывают, что нестабильность эталона можно снизить до 1×10^{-18} .

Размещение измерительных станций радиоуправления орбит спутников России на территории Никарагуа, Бразилии, ЮАР и в Антарктиде повышает точность расчёта эфемерид, передаваемых далее с наземных станций на спутники. Повышение частоты обновления информации на спутнике уменьшает продолжительность расхождения бортовой шкалы времени спутника и наземного эталона. В условиях отсутствия наземных станций закладки информации на спутники вне территории России эффективной альтернативой становится передача эфемеридно-временной информации через разрабатываемые в настоящее время межспутниковые линии связи. При этом периоды между обновлением эфемеридно-временной информации на спутнике можно уменьшить с 12 часов в настоящее время до 1 часа, пропорционально уменьшится погрешность от расхождения шкал времени спутника и наземного эталона.

Использование системы ГЛОНАСС в стандартном режиме удовлетворяет требования широкого круга потребителей. В то же время для ряда приложений (например, заход на посадку воздушных судов по категориям Международной организации гражданской авиации (ИКАО), маневрирование морских судов в «узкостях», решение топогеодезических и других задач) необходима более высокая точность навигационно-временного обеспечения. Она достижима при использовании специальных режимов работы ГЛОНАСС, одним из которых служит так называемый дифференциальный режим (рис. 4). Принцип его организации состоит в использовании двух приёмников сигнала, один из которых (опорная

измерительная станция), как правило, неподвижен и расположен в точке с известными координатами, а другой (навигационная аппаратура потребителя) может находиться в движении.

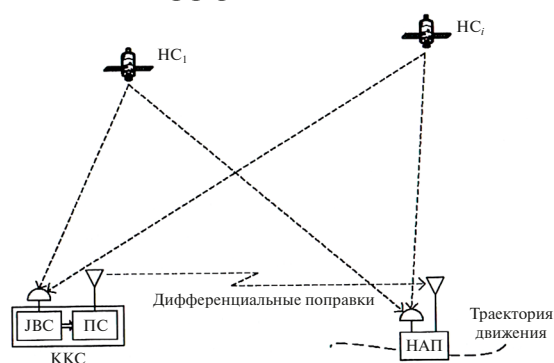
Если приёмники располагаются близко друг к другу, то измеренные от одних и тех же навигационных спутников псевдодальности будут содержать одни и те же значения медленно меняющихся погрешностей измерений (ионосферной, тропосферной, релятивистской и других). Поскольку координаты опорной измерительной станции известны точно, то, сравнивая их с координатами, вычисленными измерительной станцией при приёме навигационного сигнала со спутника, можно определить величины систематических ошибок, называемых дифференциальными поправками. Передавая эти поправки по любой линии связи, реально проводить коррекцию координат потребителя.

На практике использование сигналов с одних и тех же навигационных спутников крайне затруднительно (при работе в совмещённых орбитальных группировках в зоне видимости потребителя до 30 космических аппаратов), поэтому корректирующие поправки рассчитываются по всей совокупности видимых спутников, а аппаратура потребителя выбирает любое созвездие из четырёх космических аппаратов для навигации.

При одной контрольно-корректирующей станции дифференциальных поправок дифференциальная подсистема называется локальной (дальность зоны обслуживания до 300 км). С увеличением количества контрольно-корректирующих станций зона обслуживания увеличивается, в пределе становясь широкозонной с дальностью обслуживания до 5000 км [3, 4]. В этом случае дифференциальные поправки обычно передаются спутниками связи.

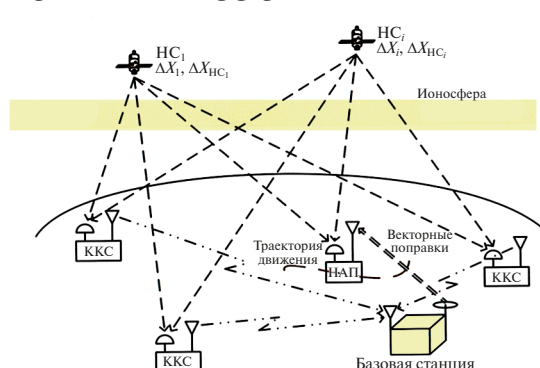
Существующая российская дифференциальная подсистема повышает точность навигации по сравнению с навигационной базовой услугой примерно в 2 раза. В перспективе планируется создать

Локальная дифференциальная подсистема



Дальность зоны обслуживания до 300 км

Широкозонная дифференциальная подсистема



Дальность зоны обслуживания до 5000 км

Рис. 4. Принцип организации дифференциального режима

отечественную дифференциальную коррекцию и мониторинг с параметрами, удовлетворяющими требованиям ИКАО для навигации самолётов гражданской авиации при посадке на необорудованные аэродромы: информация с задержкой не более 6 с; точность на уровне 0.5 м с гарантией целостности навигационного поля. С учётом территории Российской Федерации в состав такой системы должны входить около 50 станций измерений и мониторинга.

Следующий этап в повышении точности навигации – создание системы высокоточного позиционирования, по аналогии с создаваемыми в мире. Принцип её работы: за счёт увеличения разрядности навигационного сигнала и специальных алгоритмов обработки система производит расчёт и передачу потребителю в реальном времени корректирующей информации, использование которой одновременно с приёмом базовых сигналов ГЛОНАСС обеспечивает высокоточные навигационные определения [3]. Проведённые испытания показали, что высокоточная навигация, базирующаяся на системах GPS (США) и ГЛОНАСС, имеет практически одну и ту же точность.

Состояние космических аппаратов в действующей орбитальной группировке характеризуется фактическим сроком их активного существования относительно гарантийных сроков, составляющих 7 и 10 лет в зависимости от модификации спутников. Спутники работают надёжно, некоторые превысили гарантийный срок более чем в 2 раза. Тем не менее прогноз остаточного срока их активной работы убеждает в необходимости плановой замены 6 космических аппаратов в течение 1–2 лет.

Соответствующая программа замены спутников до 2033 г. госкорпорацией “Роскосмос” подготовлена и реализуется.

Общая проблема производства любой сложной техники, в том числе спутников “Глонасс”, – ограничения поставок электронно-компонентной базы из-за рубежа. До 2014 г., когда были введены первые санкционные ограничения, доля импортной электронно-компонентной базы в производстве навигационных спутников доходила до 42% (три модификации аппаратов с таким оснащением входят в состав действующей орбитальной группировки). Меры импортозамещения, предпринятые госкорпорацией “Роскосмос” за последние 10 лет, обеспечат к 2030 г. переход в два этапа на стопроцентную электронно-компонентную базу отечественного производства.

Развитие орбитальной группировки системы ГЛОНАСС предполагает разработку и реализацию нескольких научно-технических направлений (рис. 5).

1. Запуск с 2025 г. модернизированных спутников “Глонасс-К2” в импортозамещающем варианте с набором всех разработанных ранее дополнительных к навигации задач.
2. Многофункциональные аппараты будут производиться и далее, модифицируясь, например, по составу навигационных сигналов и обеспечению региональных зон с повышенной (до 20 дБ) мощностью навигационного сигнала.
3. Для оперативного поддержания навигационного поля разрабатываются мононавигационные космические аппараты – малые (около 0.5 т) спутни-

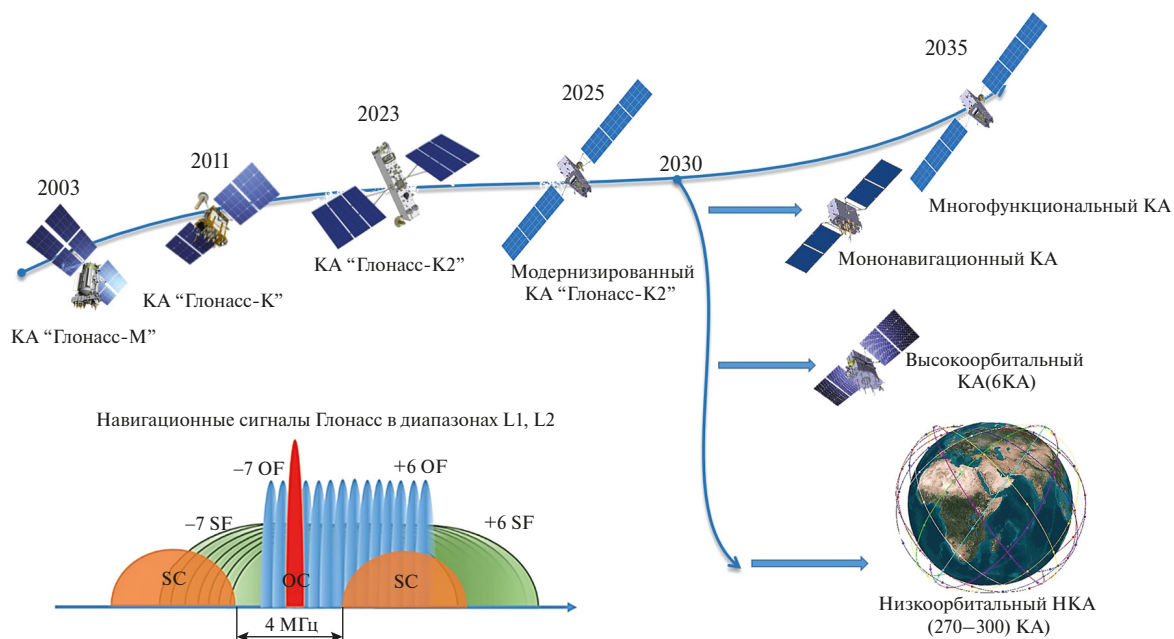


Рис. 5. Развитие орбитальной группировки космического комплекса системы ГЛОНАСС

ки с возможностью группового запуска, обеспечивающие излучение только навигационного сигнала.

4. Система высокоорбитальных космических аппаратов (6 спутников на трёх геосинхронных орбитах) повысит доступность навигационного сигнала в условиях городов и сложных рельефов на территории России, обеспечит излучение корректирующей информации для высокоточной навигации [5].

5. Прорабатывается вопрос создания многоспутниковой (до 300 аппаратов) низкоорбитальной (от 500 до 1500 км) навигационно-связной системы, которая в дополнение к существующей орбитальной группировке обеспечит ряд дополнительных свойств для улучшения навигации, в том числе увеличение мощности сигнала от 200 до более чем в 1000 раз, в зависимости от высоты орбиты системы; возможность передачи навигационного сигнала в связных диапазонах; более быстрое обновление информации на спутниках, так как период обращения низкоорбитальных аппаратов в несколько раз меньше.

Продолжается разработка новых навигационных сигналов для всех создаваемых аппаратов — как гражданских, так и специального назначения.

Самим своим появлением космические радионавигационные системы совершили революцию в методах навигации. Кардинальные изменения стали возможны благодаря уникальному сочетанию характеристик этих систем: метровой (в дальнейшем дециметровой) точности определения координат, глобальной доступности информации в любой точке земной поверхности в любое время и в любых метеоусловиях, компактности и низкой стоимости аппаратуры потребителей. Однако все современные спутниковые системы навигации обладают ограниченной помехоустойчивостью, в то время как для критически важных применений необходимы помехозащищённые навигационные средства, дополняющие или замещающие космические радионавигационные [6].

В перечень дополняющих средств входят: кодирование сигналов в защищённых каналах спутниковой навигации (например, гражданский код C/A системы GPS обеспечивает уверенный приём информации при превышении уровня помехи над навигационным сигналом в 250 раз, а использование кода P(Y) — до 2500 раз); создание наземных радиосистем для локальной навигации; создание низкоорбитальной системы спутниковой навигации, обеспечивающей повышение мощности навигационного сигнала на три порядка.

Замещающие средства, представленные на рисунке 6, объединяют инерциальные навигационные системы (на базе гироскопов и акселерометров) — для замещения длительностью до одного часа спутниковой навигации вследствие дрейфа характеристик гироскопов; корреляционно-экстремальные системы для измерений параметров гравитационного или магнитного полей Земли (это системы глобального действия, но их точность измеряется сотнями метров при весе аппаратуры, на два порядка превышающем вес радионавигационных систем). С учётом этих особенностей в настоящее время для критически важных применений используются интегрированные инерциально-спутниковые системы, в которых совмещены приёмник спутникового навигационного сигнала и инерциальная навигационная система. При наличии спутникового сигнала его приёмником производится оценивание погрешности инерциальной навигационной системой и их компенсация в выходных данных. При пропадании спутникового сигнала происходит экстраполяция погрешностей инерциальной навигационной системы, что обеспечивает приемлемую точность продолжительностью до часа. Современные автономные инерциальные и интегрированные инерциально-спутниковые системы разработаны и внедрены в практику под руководством научного руководителя концерна «ЦНИИ «Электроприбор»» академика РАН В.Г. Пешехонова.



Рис. 6. Системы автономной навигации

Здесь следует напомнить, что космическая деятельность отдельных стран регулируется международным законодательством и соответствующими структурами. В состав основных международных организаций, связанных с координатно-временным и навигационным обеспечением, входят: Международное бюро мер и весов, Международные службы глобальных навигационных систем, Международная ассоциация геодезии, Международная служба лазерной дальнометрии, Международная служба радиointерферометрии для геодезии и астрономии, Международная служба вращения Земли. Необходимо учитывать, что все эти службы проводят (или могут начать проводить) дискриминационную политику в отношении Российской Федерации с соответствующими рисками для отечественных организаций, осуществляющих деятельность в области координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО).

По всем перечисленным направлениям КВНО страны БРИКС способны создать системы, производящие аналогичную номенклатуру продуктов, характеристики которых могут быть сопоставимы с данными международных служб (с учётом возможности решения текущих и перспективных задач). Таким образом, в целях гарантированного координатно-временного и навигационного обеспечения можно рекомендовать выдвинуть инициативу создания консорциума стран БРИКС для выполнения функций соответствующих международных организаций в рамках правового поля стран БРИКС и на международной арене.

В завершение следует отметить, что система ГЛОНАСС в качестве основы отечественного координатно-временного и навигационного обеспечения предполагается к использованию и в ближайшие десятилетия. Её поддержание и развитие — одна из важнейших научно-технических задач Российской академии наук и промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 17 мая 2007 года № 638 (ред. от 12.04.2019) “Об использовании глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития Российской Федерации”. <https://rulaws.ru/president/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-17.05.2007-N-638/> (дата обращения 06.02.2024).
2. Decree of the President of the Russian Federation No. 638 of May 17, 2007 (as amended on April 12, 2019) “On Using the Global Navigation Satellite System (GLONASS) to Promote Social and Economic Development in the Russian Federation”. <https://rulaws.ru/president/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-17.05.2007-N-638/> (access date February 6, 2024).
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. GLONASS. Principles of Construction and Operation. Perov A.I. and Kharisov V.N., Eds. Ed. 4th M.: Radiotekhnika, 2010. (in Russ.)
4. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. GLONASS. Modernization and Prospects of Development, Perov, A. I., Ed., M.: Radiotekhnika, 2020. (in Russ.)
5. Карутин С.Н., Власов Н.Б., Дворкин В.В. Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем. М.: Изд-во МГУ, 2014. Karutin S.N., Vlasov N.B., Dvorkin V.V. Differential Correction and Monitoring of Global Navigation Satellite Systems. M.: Izd. MGU, 2014 (in Russ.)
6. Владимиров В.М., Ланухин Е.Г., Борисов В.А. Влияние дополнительных группировок спутников на доступность навигационной системы ГЛОНАСС // Вестник воздушно-космической обороны. 2023. № 1(37). С. 32–46. Vladimirov V.M., Lapukhin E.G., Borisov V.A. Effect of additional satellite constellations on the availability of the GLONASS navigation system // Vestnik VKO (Aerospace Defense Herald). 2023. V. 1. № 37. P. 32–46. (in Russ.)
7. Пешехонов В.Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 1(116). С. 3–11. Peshekhonov V.G. High-precision navigation independently of global navigation satellite systems data // Gyroscopy and Navigation. 2022. V. 13. P. 1–6.

RUSSIAN NAVIGATION SATELLITE SYSTEM: RESULTS AND PROSPECTS

N.A. Testodov^{a,*}

^a*Institute of Space Technologies of the Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

^{*}*E-mail: priem@ist.krasn.ru*

Global navigation satellite systems, including the Russian GLONASS, have become an integral part of society's life. The article discusses the basic principles of navigation, the composition of the space complex, the errors in determining the position of the consumer and methods for improving the most important characteristics of the system, primarily accuracy. Special attention is paid to the state and development of the orbital grouping of the GLONASS system as its key link and to improving noise immunity, critical for any dual-use satellite system, the principles of creating integrated inertial navigation systems are given. Proposals are made to counter threats related to coordinate-time and navigation support by creating a consortium of BRICS countries.

The article was prepared on the basis of a report presented at the scientific session of the General Meeting of Members of the Russian Academy of Sciences on December 12, 2023.

Keywords: spacecraft, coordinate-time and navigation support, global navigation satellite system, pseudodality, differential systems.