

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Кружков Дмитрий Михайлович



**МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И СРЕДСТВА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов

автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Информационно управляющие комплексы летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный консультант	Пасынков Владимир Викторович, д.т.н., доцент, главный конструктор, заместитель генерального директора Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения».
Официальные оппоненты	Степанов Олег Андреевич, д.т.н, проф., чл.-корр. РАН, начальник Научно-образовательного центра Акционерного общества «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор» Бетанов Владимир Вадимович, д.т.н, проф., чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник – заместитель начальника центра Акционерного общества «Российские космические системы» Гаязов Искандер Сафаевич, д.т.н., заведующий лабораторией федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной астрономии Российской академии наук»
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

Защита состоится «16» октября 2025 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT_ID=185321

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.327.03, д.т.н., доцент

А.В. Старков

Актуальность темы

Современные глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), включая ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou, интегрированы как системы двойного назначения в народное хозяйство (транспорт, системы жизнеобеспечения и т.д.), а также в область военной и специальной техники. Иными словами, сложившийся на сегодня уровень использования ГНСС свидетельствует о насущной востребованности их возможностей, предоставляемых любому потребителю. Одновременно с этим неуклонно растут и требования к качеству предоставляемых услуг в отношении потенциальных характеристик точности и в широком смысле – надежности решения задачи навигации. С развертыванием в XXI веке ГНСС нового, вслед за ГЛОНАСС и GPS, поколения таких систем конкуренция в этой области вышла на новый виток. Как следствие, разработчики и ответственные за поддержание и эксплуатацию ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou профильные организации постоянно решают одновременно ряд задач, включая модернизацию системы в целом, модификацию ее отдельных сегментов, совершенствование наземных и бортовых аппаратных средств, внедрение новых подходов и алгоритмов при решении рутинных задач, обновление нормативной и пользовательской документации и т.д.

Проводимые мероприятия, в том числе исследования и разработки, направленные на улучшение характеристик ГНСС, одновременно приводят и к усложнению процессов функционирования и сопровождения этих систем. В конечном счете направление развития ГНСС определяется на государственном уровне. В частности, в нашей стране основная концепция развития ГЛОНАСС определяется федеральными программами, утверждаемыми постановлениями Правительства РФ, в том числе выполненной федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы», а также соответствующими положениями государственной программы РФ «Космическая деятельность России», в которой за ГЛОНАСС закреплён отдельный федеральный проект «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС». Обе упомянутые выше программы включают комплекс мероприятий, обеспечивающих всестороннее развитие ГЛОНАСС. В данной работе обсуждаются актуальные свойства системы, которыми она будет располагать благодаря совершенствованию технической составляющей, а именно: оснащение новой аппаратурой, в том числе на борту перспективного космического аппарата «Глонасс-К2», расширение состава и улучшение характеристик размещенных на Земле средств (беззапросных и запросных станций), совершенствование аппаратной части, методов и алгоритмов применения текущей наземной и бортовой аппаратуры, включая бортовые синхронизирующие устройства, квантово-оптические системы, межспутниковую лазерную навигационно-связную систему (МЛНСС), аппаратуру для проведения радиотехнических межспутниковых измерений, межспутниковую информационную радиолинию, перевод бортовых часов ГЛОНАСС на водородный тип с суточной нестабильностью, измеряемой единицами пятнадцатого знака секунды, а также развитие отдельных

функциональных дополнений ГЛОНАСС и способов их применения. При этом одним из ключевых направлений совершенствования ГЛОНАСС было и остается повышение точности навигации, в том числе «базовой», под которой будем далее понимать навигацию при использовании сигналов орбитальной группировки (ОГ) ГЛОНАСС без привлечения дополнительных средств и источников навигационных данных, т.е. в абсолютном режиме. Необходимо подчеркнуть, что понятие «ОГ ГЛОНАСС» здесь и далее включает не только средневисотный сегмент, но и перспективные его дополнения, такие, как высокоорбитальный космический комплекс (ВКК) и, возможно, геостационарные и низкоорбитальные дополнения.

Общепринятым критерием оценки точностных характеристик ГНСС на текущий момент принято считать эквивалентную погрешность псевдодальности (ЭППД), обусловленную только космическим сегментом, или SISRE, Signal-in-space range error. Несмотря на то, что он определен в скалярной форме, данный критерий агрегирует целый ряд свойств и характеристик навигационной системы, являющихся результатом ее штатного функционирования как интегрированной системы, включающей не только орбитальный сегмент в виде навигационных космических аппаратов, но и ряд дополнений в форме соответствующих средств наземной инфраструктуры. В настоящее время уровень развития ГЛОНАСС таков, что к ухудшению SISRE приводит, прежде всего, рост ошибок часов спутников. Кроме того, существенное влияние на SISRE оказывают такие факторы, как рост ошибок эфемерид, неопределенная эволюция параметров вращения Земли (ПВЗ), а также различные неформулярные погрешности бортовой аппаратуры.

Таким образом, стремление усовершенствовать эксплуатируемую ГНСС требует разносторонней «работы» с целым рядом различных источников ошибок, которые являются следствием влияния на навигационную систему неконтролируемых факторов различной физической природы. Такую в указанном смысле «работу» с каждым из этих факторов осуществляет определенная служба или организация, а иногда даже все исполнители соответствующей Федеральной целевой программы (ФЦП) и/или Государственного контракта со своими подходами, алгоритмами, техническими и/или идеологическими ограничениями или решениями. Регулирование направленности и объема таких разработок, а также организация их взаимодействия в Российской Федерации осуществляется на государственном уровне Роскосмосом и Министерством обороны. В силу особой важности поддержания и развития ГЛОНАСС в процессе выполнения упомянутой выше федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» были получены результаты, которые позволили существенно улучшить характеристики системы, в том числе SISRE, значение которого за последние годы составляет 1,4 метра (по уровню вероятности 0,95). Достигнутый прогресс обеспечен комплексом успешно проведенных исследований и разработок, направленных на создание и совершенствование: методов и алгоритмов баллистико-навигационного обеспечения НКА ГЛОНАСС, методик и алгоритмов сбора и обработки данных

развёрнутых в процессе реализации ФЦП сетей наземных измерительных станций, парка наземной и бортовой аппаратуры. Ведущую роль в достижении действующих характеристик ГЛОНАСС выполняют созданные в Российской Федерации центры анализа и поддержки в части определения навигационных, геодезических и геодинимических параметров: Информационно-аналитический центр координатно-временного обеспечения, Система прецизионной навигации Министерства обороны, Система высокоточного определения эфемеридно-временной информации, Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли России и другие организации, непрерывно принимающие участие в поддержании текущего состояния навигационного поля ГЛОНАСС.

Помимо SISRE существенно выросла точность эфемерид ГЛОНАСС, транслируемых в кадре навигационному потребителю, главным образом, на аппаратах «Глонасс-М» и, в дальнейшем, «Глонасс-К».

Тем не менее, несмотря на достигнутый прогресс, на текущий момент еще остался ряд проблем, решение которых должно обеспечить отечественной ГНСС ГЛОНАСС лидирующую позицию в отношении точности и доступности среди конкурентных ГНСС, как минимум на территории РФ, что требует почти трехкратного снижения обсуждаемого показателя до уровня менее 0,5 м, если иметь в виду системы GPS, Beidou и Galileo. Для достижения намеченной цели предполагается в основном дальнейшее развертывание и совершенствование наземных аппаратных средств, увеличение числа операций обслуживания орбитального сегмента и частоты загрузки данных. Данные шаги являются понятными и объективно необходимыми, однако, следует отметить, что улучшение характеристик при таком подходе имеет некоторый «потолок» в силу существования ресурсных ограничений и он будет достигнут, если не в ближайшее время, то, с большой вероятностью, в перспективе. В связи с изложенным в данной работе рассматривается вариант достижения поставленной цели снижения SISRE до уровня менее 0,5 м (0,95) за счет поэтапного перестроения и некоторого совершенствования технологических процедур штатного функционирования ГЛОНАСС, задачей которых является привлечение современных и перспективных бортовых и автономных наземных радиотехнических и оптико-электронных аппаратных средств, обеспечивающих за счет совместной обработки массивов измерений, проводимых между спутниками орбитальных группировок и между спутниками и наземными станциями и оптическими терминалами, повышение точности эфемеридной и частотно-временной информации до такого уровня, который обеспечит требуемое улучшение показателя SISRE в оперативном режиме, а также более высокую точность транслируемых в навигационном кадре потребителю эфемерид и поправок к бортовым шкалам времени и, в конечном итоге, большую точность формируемого на Земле навигационного решения потребителя. При этом предлагаемый вариант применения упомянутых наземных и бортовых радиотехнических и оптико-электронных аппаратных средств в интересах повышения точности эфемеридно-временного обеспечения требует комплексной разработки методик и алгоритмов.

Получаемые благодаря их внедрению преимущества очевидны: новые радиотехнические средства за счет квазиглобального размещения их на земле и возможности проведения взаимных сеансов измерений земля-спутник и также сеансов спутник-спутник с последующим обменом данными обеспечивают расширение традиционных возможностей штатных средств наблюдения по количеству и равномерности проведения сеансов сбора телеметрии, повышая возможности в части уточнения эфемерид и взаимной синхронизации часов, в том числе, с часами системы (там где на земле у станций есть соответствующее сопряжение). Аналогичным образом реализуется ряд преимуществ новых лазерных и оптических аппаратных средств, таких, как высокая точность синхронизации, низкий уровень шума измерений и исключительная помехозащищенность.

При этом формируемые процедуры обработки измерительной информации должны быть реализованы таким образом, чтобы при наличии соответствующих ресурсов бортового вычислителя на борту каждого навигационного космического аппарата (НКА) орбитальной группировки они могли бы функционировать в полном объеме и решать поставленную задачу независимо от загружаемых с наземного комплекса данных, что обеспечит еще одно неоспоримое преимущество ГЛОНАСС перед конкурентами. Однако, в рамках предлагаемого подхода возникает целый ряд усложняющих его реализацию проблем и противоречий:

- отсутствие единой концепции применения новых радиотехнических и оптико-электронных средств в целом и, конкретных вариантов облика реализуемых технологических циклов в частности;

- отсутствие синхронизации упомянутых аппаратных средств с бортовым синхронизирующим устройством и часами системы;

- наличие существенных систематических погрешностей измерений при проведении соответствующих измерений новой аппаратурой в S и оптическом диапазонах и необходимость их сличения;

- при реализации штатного навигационного поля через бортовой излучатель навигационного сигнала (БИНС) происходит компенсация фактических бортовых задержек, в результате чего ни наземная станция, ни потребитель не в состоянии их определить, что становится критичным для реализации в полной мере свойств новой аппаратуры и, таким образом, процедура формирования частотно-временной информации должна проводиться путем сличения с БИНС по другому тракту.

Перечисленные проблемы не исчерпывают все существующие, но их решение требуется для реализации изложенного выше подхода к повышению точности ГЛОНАСС. Подводя итог сказанному, можно констатировать актуальность решения рассматриваемого в данной работе комплекса задач, направленных на улучшение характеристик ГЛОНАСС, а именно: достижение более высокого уровня точности определения в различных режимах функционирования НКА параметров, влияющих на систему в целом. К числу таких параметров относятся: эфемериды НКА ГЛОНАСС в инерциальной системе координат на произвольно заданном отрезке времени; значения

параметров вращения Земли (смещение полюса относительно его среднего положения на эпоху и неравномерность суточного вращения Земли) и их эволюция; уходы бортовых шкал времени относительно шкалы времени системы и друг относительно друга; значения выносов фазовых центров антенн во всех используемых частотных диапазонах (S, L); задержки в бортовой аппаратуре на различных частотах и по каждой литере.

Настоящая диссертация посвящена анализу необходимых условий для улучшения характеристик ГЛОНАСС в интересах обеспечения на основе информационной технологии, включающей адекватные для этой цели методы и алгоритмы, лидирующую позицию ГЛОНАСС в отношении точности среди конкурентных ГНСС в соответствии с парадигмой трансформации космических систем до 2030 года. Представленный выше подход можно формализовать в форме функциональной схемы (рис. 1).

РЕСУРСЫ

Аппаратные средства: существующие, перспективные бортовые и наземные	Информационные технологии	Инфраструктура ГЛОНАСС, квантово-оптические системы, радиоинтерферометры со сверхдлинной базой
--	----------------------------------	--

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Часы	Эфемериды	Параметры вращения Земли (ПВЗ)	Средства синхронизации и сличения	Орбитальные и системные дополнения	Иные функциональные возможности	Автономность
Точность эфемерид, SISRE				Целевые возможности, применение		
				Доступность		

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, СЦЕНАРИИ, АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Технологические циклы			Сценарии	
Прогноз и уточнение эфемерид, согласующих параметров	Прогноз и оценка ПВЗ	Оценка частотно-временных поправок	Совмещение оценки эфемерид и ПВЗ	Применение альтернативных бортовых аппаратных средств

СРЕДСТВА, ИНСТРУМЕНТЫ

Бортовые радиотехнические средства	Наземные автономные станции	Бортовые и наземные квантово-оптические средства	Межспутниковая лазерная навигационно-связная система
------------------------------------	-----------------------------	--	--

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценки и показатели: в штатном технологическом цикле / в режиме без загрузки данных с наземного комплекса управления					
Эфемериды	ПВЗ	SISRE	Выносы фазовых центров антенн	Задержки в приемо-передающих трактах	Параметры преобразования между системами координат
↓	↓	↓	↓	↓	↓
X / Y _{CBC} X / Y _{BKK}	X / Y _{CBC} X / Y _{BKK}	X / Y _{CBC} X / Y _{BKK}	X / Y	X / Y	X / Y

Рис. 1. Функциональная схема путей совершенствования ГЛОНАСС

Существенные результаты в обсуждаемой предметной области, приблизившие в той или иной степени текущий уровень определения перечисленных выше навигационных параметров за счет разработки и поэтапного внедрения новых методов, технологий и алгоритмов, реализованы в трудах целого ряда советских и российских ученых, в том числе: работников 50 ЦНИИ КС: Эльясберга П.Е., Бажинова И.К., Ястребова В.Д., Назаренко А.И., Брыкова А.В., Цепелева А.В., Неволько М.П., Чаплинского В.С., Панюшина А.Н., Глыбочко С.И., Пошеченкова А.А., Куропятникова А.Д., Щербинина В.Н., 4 ЦНИИ МО – Жукова А.Н., Забокрицкого А.В., Хомяка Р.В., Зотова С.М., Титова Е.В.; ИПМ им Келдыша – Акима Э.Л.; НПО ПМ (ныне ИСС им. ак. М.Ф.Решетнёва) – Бартенева В.А, Гречкосеева А.К.; РНИИ КП – Дворкина В.В.; 32 ГНИИ МО – Донченко С.И.; ЦНИИМаш – Иванова Н.Е., Почукаева В.Н., Ревнивых С.Г.; академии им. А.Ф.Можайского – Дулевича В.Е., Мамона П.А.; академии Петра Великого – Разорёнова Г.Н., Бетанова В.В., РИРВ – Шебшаевича В.С. и многих других, внесших свой вклад в современные облик отечественной спутниковой навигационной системы. Как следствие, дальнейшее совершенствование и развитие ГЛОНАСС вынуждает учитывать все больше различных взаимосвязанных ограничений и сложившихся обстоятельств. Иными словами, при создании обсуждаемой информационной технологии необходимо учитывать, что решение каждой из задач совершенствования характеристик ГЛОНАСС, а также задач уточнения тех или иных параметров по отдельности, то есть в отрыве друг от друга, не позволит достичь ожидаемого результата, а именно трехкратного снижения показателя SISRE, так как все эти задачи взаимосвязаны. Например, точность прогнозирования эфемерид в инерциальной системе координат зависит от точности расчета гравитационного потенциала Земли, для чего необходимо обладать знаниями о фактической ориентации Земли и, соответственно, об эволюции параметров вращения Земли. В то же время для оценки параметров вращения Земли на основе специальной обработки измерений до наземных станций необходимо знание истинных эфемерид НКА, ошибки в сведениях о которых препятствуют получению оценок ПВЗ. Другой пример: вычисление эфемерид на будущих отрезках времени требует проведения процедуры высокоточной оценки начальных условий, которая не может быть выполнена без соответствующего высокоточного прогноза (иначе решение данной задачи не получит сходимости), который, в свою очередь, требует знания начальных условий с высокой точностью, то есть получаемых из апостериорных оценок (рекуррентная задача с постоянным повторением друг за другом этапов прогнозирования и уточнения). Наконец, третий пример: высокоточная оценка эфемерид на борту НКА требует знания фактических значений ряда параметров, таких как ошибка значения «выноса» фазового центра антенной системы (ФЦ АС), задержка в приемо-передающих трактах аппаратуры межспутниковых измерений, которые могут быть определены только путем обработки измерений с применением апостериорных данных с эфемеридами НКА. Таким образом, в рамках разработки обсуждаемой информационной технологии наблюдается значительное число взаимных связей, влекущих

сложности при выборе источника первичных данных, состава выполняемых процедур и соответствующих алгоритмов. Отдельно стоит упомянуть, что радиотехнические измерения псевдодальностей, формируемые в том числе между НКА и наземными станциями (НС), содержат систематические ошибки, которые вызваны задержкой сигнала в приемно-передающих трактах, в тропосфере и ионосфере, и отдельно устранить которые стандартными алгоритмами обработки (фильтрацией измерений) невозможно, так как в измеренной однопутевой псевдодальности все систематические ошибки ненаблюдаемы по отдельности. Все перечисленные выше проблемы в настоящий момент решаются в наземных центрах анализа путем агрегации и обработки массивов данных, поступающих от наземных запросных и беззапросных станций, метеослужб, радиоинтерферометров со сверхдлинной базой, оптических систем и т.д.

В связи со сказанным разрабатываемая технология формирования высокоточной (в смысле улучшения SISRE до 0.5 м) эфемеридно-временной информации, которая может проводиться в том числе на борту НКА, является уникальной с точки зрения подхода и предполагаемой возможности реализации соответствующих итеративных процедур, то есть набора шагов для поэтапного (там, где доступна пошаговая последовательность процедур) или одновременного (там, где это возможно с точки зрения выполнения условий наблюдаемости) устранения или учета (там, где не представляется возможным убрать их совсем) факторов, препятствующих достижению нового уровня характеристик ГЛОНАСС в части точности и автономности. Таким образом, в рамках настоящей диссертации рассматривается ряд взаимосвязанных частных задач, которые являются компонентами общей задачи улучшения характеристик ГЛОНАСС и решение каждой из которых прямо или косвенно устраняет либо снижает до нужного уровня влияние неконтролируемых факторов (погрешностей), перечисленных выше, и «увязывание» которых друг с другом в единое целое формирует новый вариант технологического цикла эксплуатации НКА ОГ ГЛОНАСС.

Научная проблема. В диссертации содержится обобщение и предложения по решению научно-технической проблемы совершенствования потребительских характеристик ГЛОНАСС в части обеспечиваемой точности в процессе функционирования навигационных космических аппаратов (НКА).

Целью диссертационной работы является создание научного задела, упрощающего внедрение предлагаемых информационных технологий в интересах улучшения характеристик ГЛОНАСС до уровня, обеспечивающего этой системе лидирующую позицию в отношении точности среди конкурентных ГНСС.

Объект исследования. Навигационные космические аппараты ГЛОНАСС современных и перспективных орбитальных группировок, наземные и бортовые аппаратные средства ГЛОНАСС.

Предмет исследования. Варианты циклограмм функционирования и сценариев взаимодействия НКА ОГ ГЛОНАСС, в том числе с наземными средствами, методики и алгоритмы формирования эфемеридно-временной

информации на борту НКА, методики и алгоритмы обработки на борту НКА данных и измерений в интересах определения составляющих погрешности навигационного решения потребителя за счет космического сегмента, в частности: эфемерид НКА ГЛОНАСС в инерциальной системе координат, значений параметров вращения Земли, уходов бортовых шкал времени относительно шкалы времени системы и друг относительно друга, значений выносов фазовых центров антенн, задержек в бортовой аппаратуре на различных частотах и по каждой литере.

Задачи исследования.

1. Формирование облика новых технологических циклов функционирования бортовых средств современных и перспективных НКА ГЛОНАСС, разработка математических моделей и прототипов алгоритмов, обеспечивающих решение на борту задач по определению параметров движения НКА и прочих согласующих данный процесс параметров при одновременном улучшении характеристик ГЛОНАСС.

2. Формирование облика информационных технологий высокоточного прогнозирования и определения на борту НКА эфемерид ОГ, предназначенных для трансляции потребителю в оперативном режиме с учетом уточнения всех вспомогательных данных в различных режимах функционирования ОГ.

3. Исследование эффективности предлагаемых информационных технологий, а также разработанных методик и алгоритмов с точки зрения достигаемых характеристик ГЛОНАСС и необходимых для их реализации требований, в том числе с применением реальных данных.

4. Разработка предложений по применению разработанных и реализованных в программном макете методик и алгоритмов в интересах обеспечения ГЛОНАСС лидирующего положения в отношении точности среди конкурентных ГНСС.

Методы исследования. Системный анализ, математическое и имитационное моделирование, механика космического полета, методы обработки данных.

Научная новизна и значимость (соответствующие пункты паспорта специальности 2.5.16 указаны в скобках):

1. Разработаны: модели и алгоритмы высокоточного прогнозирования эфемерид на борту НКА (п.1); модели, алгоритмы и циклограммы уточнения эфемерид НКА на основе межспутниковых измерений с применением различных бортовых аппаратных средств (п.7,12); модели и алгоритмы определения на борту параметров вращения Земли (п.7,12); облик технологического цикла функционирования современных и перспективных НКА ОГ ГЛОНАСС формирования на борту НКА высокоточной эфемеридно-временной информации на основе использования предлагаемых информационных технологий и существующих аппаратных средств; прототипы бортовых алгоритмов (п.17), включая необходимые условия их реализации.

2. Создан программный макет (п. 14,15), обеспечивающий реализацию моделей, методик и алгоритмов по п.1.1-1.5; анализ особенностей процессов функционирования НКА ГЛОНАСС в рамках новых технологических циклов;

оценку эффективности разработанных алгоритмов и настроенных циклограмм и сценариев функционирования объектов исследования.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Формализована и реализована в виде прототипа бортового алгоритма информационная технология высокоточного прогнозирования и уточнения эфемерид на борту НКА, включающая требующиеся для ее реализации модели и алгоритмы, вспомогательные информационные технологии прогнозирования и уточнения инерциальных эфемерид, ПВЗ и других согласующих параметров, а также варианты циклограмм функционирования и сценариев взаимодействия НКА ОГ ГЛОНАСС в целом и совокупности бортовых и наземных аппаратных средств в частности;

2. Формализована и реализована в составе прототипа единого бортового алгоритма оптимальная с точки зрения точности методика прогнозирования эфемерид и ПВЗ, включая варианты применяемых моделей и настроек алгоритмов, а также определены уровни достигаемой точности и соответствующей ошибкам прогнозирования эквивалентной погрешности псевдодальности;

3. Сформирована концепция и создана процедура в составе прототипа единого бортового алгоритма уточнения эфемерид и ПВЗ на основе обработки измерений до наземных станций с учетом предложений, методик и алгоритмов устранения широкого спектра неконтролируемых факторов, привносящих неприемлемые с точки зрения требований к точности погрешности измерений;

4. Сформированы и проверены на конкретных примерах предложения по интеграции в технологические циклы ГЛОНАСС дополнительных информационных технологий и средств измерений, включая радиотехнические и оптические наземные и бортовые аппаратные средства, привлекаемые в интересах достижения поставленной цели – получения высокоточных эфемерид на борту НКА в рамках отработки предлагаемой информационной технологии.

5. Разработан программный макет, обеспечивающий экспериментальную отработку разработанных моделей, методов и алгоритмов как в отдельных элементах предлагаемой технологии, так и в комплексном эксперименте, позволяющий провести их последовательную донстройку, модернизацию, модификацию и апробацию на реальных данных.

Достоверность результатов подтверждается использованием верифицированного математического аппарата, обоснованием результатов сравнения с аналогичными методиками и моделями, а также доступными экспериментальными данными.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты работы внедрены в АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева», в АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», на кафедре 704 «Информационно-управляющие комплексы ЛА» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», в подтверждение получены соответствующие Акты о внедрении.

Апробация работы. Результаты работы апробированы, опубликованы в тезисах и трудах международных и отечественных научно-технических конференций: Международного семинара «Навигация и управление движением» (г. Самара, Самарский государственный университет, 2020), XIV Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления (с. Дивноморское, Южный федеральный университет, 2021), XVI Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления (г. Волгоград, ВолгГТУ, 2023), XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (г. Москва, ИПУ РАН, 2024). Результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных трудах, в изданиях, входящих в список МРБД ВАК, зарегистрированных в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) и Российском центре научной информации (РЦНИ) и иностранных библиографических и реферативных базах данных SCOPUS, Web Of Science, в 3 учебных пособиях, в сборниках тезисов и трудов 4 конференций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Вариант решения комплексной научно-технической проблемы совершенствования потребительских характеристик ГЛОНАСС в форме иерархически упорядоченной совокупности информационных технологий, методик и алгоритмов, обеспечивающих достижение заявленных целей настоящего исследования. Упомянутая выше совокупность включает:

- технологический цикл функционирования современных и перспективных НКА ГЛОНАСС, сформированный с учетом требований к составу и характеристикам перспективных бортовых и наземных аппаратных средств и сценариям их взаимодействия и обеспечивающий тем самым заявленные требования по ЭППД: менее 0.5 м в течение суток (с вероятностью 0.95) и менее 1 метра в течение 1 недели в различных режимах функционирования ГЛОНАСС (с вероятностью 0.95);

- методику, алгоритмы и результаты прогнозирования и уточнения ПВЗ (единицы mas (milliarcseconds) по уровню 0.95) на борту НКА на основе имеющихся апостериорных данных и обработки данных измерений, получаемых с привлечением автономных наземных станций и дополнительных средств;

- алгоритмы и результаты прогнозирования и уточнения на борту НКА эфемерид в инерциальной системе координат на основе имеющихся апостериорных данных и обработки данных измерений с привлечением современных и перспективных бортовых аппаратных средств, обеспечивающие ЭППД, обусловленную ошибками эфемерид, на уровне менее 0.2 м (0.95);

- технологический цикл применения дополнительных средств альтернативной инфраструктуры, включая РСДБ, КОС, а также привлечения МЛНСС в интересах решения на борту навигационной задачи по оценке составляющих погрешностей измерений псевдодальностей между спутниками и между НКА и наземными станциями, обеспечивающий сантиметровую точность сличения расчетных и фактических данных.

- методику, алгоритмы и результаты уточнения выносов ФЦ АС НКА ГЛОНАСС и задержек в приемных трактах на различных линах с

применением апостериорных данных и предварительных циклов подготовки и обработки измерений НКА ОГ ГЛОНАСС.

2. Прототипы бортовых алгоритмов, обеспечивающих реализацию разработанных в составе единого программного макета перечисленных в п.1 алгоритмов и соответствующих моделей.

3. Подтверждение возможности реализации идеи достижения заявленных целей исследования путем математического моделирования разработанных процедур и технологических циклов, а также обработки реальной измерительной информации.

Личный вклад. Представленные результаты исследований получены лично соискателем либо под непосредственным руководством соискателя. Эти исследования включают формализацию задач, разработку методик и алгоритмов, создание на их основе архитектуры программно-математического обеспечения, получение и анализ результатов, формулирование выводов. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию вошёл только материал, принадлежащий лично автору. Заимствованные положения сопровождаются ссылками на их источники.

В первой главе диссертации обсуждается возможность выполнения перманентного требования повышения точности эфемерид навигационных космических аппаратов при условии привлечения в соответствующие технологические цепочки современных и перспективных бортовых аппаратных средств. Обсуждаются достигнутый уровень технологий и алгоритмов определения эфемерид НКА и те препятствия, которые на сегодняшний день не позволяют существенно изменить точность загружаемых/транслируемых в оперативном режиме эфемерид НКА, в частности: недостаточный уровень синхронизации всего парка средств сличения навигационных параметров, характеристик НКА и аппаратуры проведения измерений, высокая загрузка инфраструктуры, выделяемой на операции обслуживания и поддержки нужной точности данных, ограниченная пропускная способность канала обмена данными с НКА, географические и политические ограничения в использовании наземных станций сбора информации, ограниченная точность реализации бортовой модели движения НКА и т.д. В итоге, в первой главе развивается концепция совершенствования процедур различных режимов функционирования орбитальной группировки ГЛОНАСС. Эти процедуры характеризуются модернизацией соответствующих аппаратных и программных средств и использованием располагаемых ГЛОНАСС бортовых аппаратных средств межспутниковых измерений в интересах повышения точности эфемерид НКА. Реализация данной концепции основана на совмещении технологий высокоточного прогнозирования и последующего уточнения эфемерид на борту НКА в рамках единой технологической цепочки, где орбитальному сегменту отводится большая роль в формировании навигационных данных. При этом процедуры уточнения эфемерид основаны на применении современной и перспективной аппаратуры для проведения радиотехнических и оптических межспутниковых измерений, имеющей низкое значение СКО шума измерений. Заметим, что при подобном подходе

существует ряд технических проблем, устранение которых потребует дополнительных мероприятий, в частности: обработки межспутниковых измерений между НКА ГЛОНАСС средневысотного сегмента и перспективных дополнениях системы, синхронизации измерений от различных источников – аппаратных средств, выбора оцениваемых согласующих измерения параметров, устранения систематических погрешностей, планирования сеансов и настройки оптимальных фильтров обработки данных.

В работе предлагается реализовать описанный выше процесс формирования эфемерид на борту НКА в рамках двухэтапной процедуры, на первом этапе которой формируется высокоточный прогноз, основанный на соответствующей методике и наборе моделей и алгоритмов, объединение которых в одно целое представляет самостоятельный результат данной диссертации. Результаты прогноза используются на втором этапе для обработки измерений псевдодальностей между НКА с учетом ряда необходимых ограничений. Методика формирования высокоточного вектора прогнозных значений эфемерид на борту НКА на будущие интервалы времени основана на получении и последующем использовании в расчетах уточненных оценок начальных условий (кинематических параметров НКА) и оценок эмпирических параметров модели ускорения от солнечного давления (1) в составе правых частей уравнений движения (2):

$$a_{srp} = e_D D_0 + e_Y Y_0 + e_B (B_0 + B_C * \cos(u) + B_S * \sin(u)), \quad (1)$$

где e_D, e_Y, e_B – соответственно направляющий орт, перпендикулярный панели солнечных батарей (СБ), параллельный СБ орт и орт, дополняющий СК до правой тройки векторов; u – угол между Солнцем и радиус-вектором КА, отсчитанный в плоскости орбиты.

$$\dot{x}_i = v_{xi}; \dot{y}_i = v_{yi}; \dot{z}_i = v_{zi}; \ddot{x}_i = a_{xi}; \ddot{y}_i = a_{yi}; \ddot{z}_i = a_{zi}, \quad (2)$$

где x_i, y_i, z_i – компоненты радиус-вектора центра масс НКА в проекции на оси ИСК; v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – компоненты вектора скорости центра масс НКА в проекции на оси ИСК; a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} – компоненты вектора ускорений, действующих на центр масс НКА (в ИСК).

Упомянутые оценки начальных условий движения НКА формируются путем обработки методом наименьших квадратов невязок между имеющейся на борту траекторией движения НКА (с прошлого цикла методики или после загрузки данных) и траекторией, вычисляемой на борту с помощью интегрирования уравнения движения НКА в прошлое. Таким образом, в составе правых частей уравнений движения (2) представлены наиболее полные на сегодняшний день классические детерминированные компоненты вектора ускорений от неконтролируемых факторов (3), вычисляемые с использованием общепринятых моделей, так и полученные на основе методики эмпирические коэффициенты (1) учета влияния неопределенности солнечного давления на траекторию:

$$\bar{a}_{i\Sigma} = \bar{a}_{grav} + \bar{a}_{3b\ sun} + \bar{a}_{3b\ moon} + \bar{a}_{srp} + \bar{a}_{srp\ earth}, \quad (3)$$

где $\bar{a}_{grav}$ – ускорение, создаваемое гравитационным полем Земли, включая несферичность гравитационного потенциала и эффекты от твердых приливов; $\bar{a}_{3b\ sun}, \bar{a}_{3b\ moon}$ – гравитационные ускорения, действующие на НКА вследствие влияния Солнца и Луны; $\bar{a}_{srp}$ – ускорение, действующее от прямого солнечного излучения (1); $\bar{a}_{srp\ earth}$ – ускорения, действующие от отраженного от Земли солнечного излучения (альбедо).

Матрица частных производных (4):

$$H_i = \begin{pmatrix} \frac{\delta X}{\delta v_{x0}} & \frac{\delta X}{\delta v_{y0}} & \frac{\delta X}{\delta v_{z0}} & \frac{\delta X}{\delta D_0} & \frac{\delta X}{\delta Y_0} & \frac{\delta X}{\delta B_0} & \frac{\delta X}{\delta B_c} & \frac{\delta X}{\delta B_s} \\ \frac{\delta Y}{\delta v_{x0}} & \frac{\delta Y}{\delta v_{y0}} & \frac{\delta Y}{\delta v_{z0}} & \frac{\delta Y}{\delta D_0} & \frac{\delta Y}{\delta Y_0} & \frac{\delta Y}{\delta B_0} & \frac{\delta Y}{\delta B_c} & \frac{\delta Y}{\delta B_s} \\ \frac{\delta Z}{\delta v_{x0}} & \frac{\delta Z}{\delta v_{y0}} & \frac{\delta Z}{\delta v_{z0}} & \frac{\delta Z}{\delta D_0} & \frac{\delta Z}{\delta Y_0} & \frac{\delta Z}{\delta B_0} & \frac{\delta Z}{\delta B_c} & \frac{\delta Z}{\delta B_s} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

используемая в МНК, раскладывается на переходную матрицу движения НКА и матрицу чувствительности траектории к солнечному давлению, которые вычисляются отдельно путем раздельного их численного интегрирования.

Иллюстрация методики представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что формируемый описанным образом набор коэффициентов для выражения (1) характерен для конкретного номера НКА в конкретную эпоху и получен с учетом подбора длины обрабатываемого МНК интервала апостериорных эфемерид, дающего наименьшую сумму невязок с вычисляемой траекторией. То есть фактически, в рамках отсутствия точных сведений о тензоре инерции, отражаемости, положении центра масс каждого образца, эксплуатируемого в данный конкретный момент, НКА и прочих фактических параметрах о его форме и размерах, является пределом с точки зрения точности прогнозирования орбиты (рис. 2).

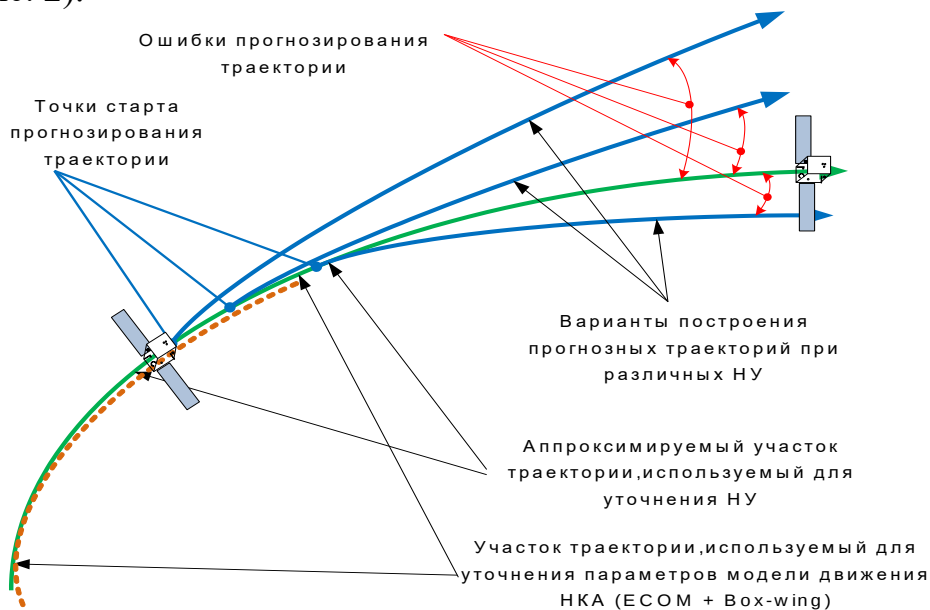


Рис.2. Иллюстрация схемы прогнозирования эфемерид

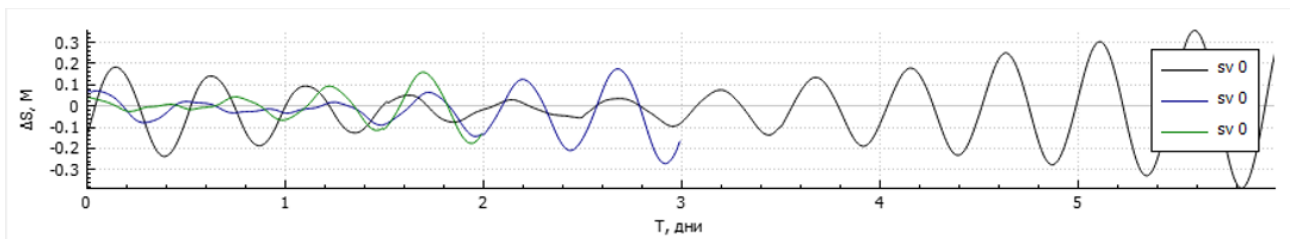


Рис. 2. Динамика радиальной ошибки вычисляемой прогнозом траектории НКА при различных длинах интервала прогнозирования

Уточнение полученных на этапе выполнения процедур прогноза эфемерид НКА выполняется путем реализации технологического цикла, состоящего из этапов формирования, сбора, передачи и обработки взаимных межспуниковых измерений псевдодальностей. Блок-схема самого алгоритма обработки представлена условно на рис. 3. При этом для разных орбитальных группировок (современной и перспективной) реализованы различные технические условия работы бортовых аппаратных средств и проведен анализ возможностей по сбору и обмену данными в интересах получения оценок эфемерид на борту НКА. С целью максимизации их точности в среднем по всему созвездию ОГ предпринимаются последовательная передача всех формируемых измерений и соответствующих им данных об эфемеридах НКА в единое для всех место обработки МНК. Уточняемые вектора различаются между ОГ: $\mathbf{X}_s = [\Delta S \ \Delta T \ \Delta W \ \Delta V_S \ \Delta V_T \ \Delta V_W]^T$ – поправки к координатам и компонентам скорости в ОСК для НКА СВС (околокруговая орбита СВС), где s – номер НКА в векторе $\mathbf{X}$, $\mathbf{X}_s = [\Delta a \ \Delta e \ \Delta i \ \Delta \Omega \ \Delta \omega \ \Delta M]^T$ – поправки к оскулирующим элементам в классических орбитальных элементах для НКА ВКК (эллиптическая орбита). Частные производные для СВС позаимствованы из прежних аналогичных работ. Частные производные дальности по вектору начальных условий движения в форме элементов Кеплера (для ВКК) вычисляются как произведение матриц ЧП дальностей по декартовым координатам, ЧП декартовых координат по вектору элементов Кеплера и ЧП текущих элементов Кеплера по начальным значениям элементов Кеплера на момент t_0 соответственно:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \bar{x}_{ij0}} = \frac{\partial \rho}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial \bar{x}_{ij}} \frac{\partial \bar{x}_{ij}}{\partial \bar{x}_{ij0}}, \quad (5)$$

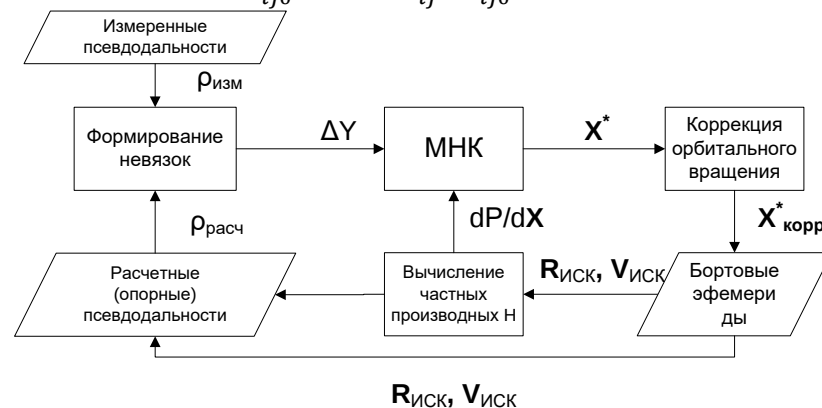


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки невязок измерений псевдодальностей и их расчетных аналогов

Результаты отработки описанных процедур с использованием программного макета, который позволил сравнить все полученные результаты с апостериорными эфемеридами Системы высокоточного определения эфемеридно-временной информации, показал, что SISRE за счет ошибок эфемерид снижается до 0.2 метра на интервале до суток (0.95).

Таким образом, в первой главе содержится описание:

- концепции предлагаемого технологического цикла, реализуемого на борту НКА ГЛОНАСС в интересах повышения точности эфемерид в инерциальной системе координат в условиях штатного функционирования системы, а также в условиях отсутствия информации с наземного комплекса управления;

- методики и алгоритмов прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС, основанных на использовании современных высокоточных математических моделей и методов, включающих как детерминированные, так и эмпирические составляющие, предназначенных для использования на любых временных интервалах (от нескольких часов до нескольких месяцев);

- алгоритмов уточнения на борту эфемерид НКА ГЛОНАСС на основе обработки измерений псевдодальностей, сформированных между парами НКА, обеспечивающих повышение точности знания эфемерид ГЛОНАСС и соответствующей им компоненты параметра SISRE (за счет эфемерид) в различных режимах функционирования системы;

- результатов отработки с использованием программного макета методики и алгоритмов прогнозирования эфемерид НКА с применением реальных данных об эфемеридах и ПВЗ;

- результатов отработки на программном макете методики и алгоритмов комплексного уточнения эфемерид различных спутниковых группировок ГЛОНАСС в режиме между закладками точных (оперативных) эфемерид и при их отсутствии, а также алгоритмов прогнозирования и уточнения эфемерид на основе обработки межспутниковых измерений с учетом обмена информацией по межспутниковой линии связи;

- оценок статистических характеристик ЭППД за счет погрешностей знания эфемерид в инерциальной СК в различных режимах функционирования ГЛОНАСС.

Во второй главе обсуждается проблема неопределенной эволюции параметров вращения Земли и влияние этой неопределённости на точность передаваемых потребителю в навигационном кадре эфемерид, итоговое значение ЭППД, а также точность прогнозирования эфемерид НКА при моделировании его движения в инерциальной системе координат. Обсуждаются современные способы определения данных параметров и соответствующие им недостатки с точки зрения оперативности и точности предоставления этих данных в ГЛОНАСС от других системных служб, а от ГЛОНАСС – через переводимые в ПЗ90 эфемериды – к потребителю. Заметим, что используемый в сегодняшней технологической цепочке эксплуатации НКА ГЛОНАСС механизм регулярной загрузки данных о фактической эволюции

ПВЗ и их прогнозе на будущие интервалы не только требует выделения на решение данной задачи ресурсов и организации соответствующей кооперации служб, но и частого повторения этих процедур вследствие значительной скорости и непредсказуемости эволюции, в первую очередь, DUT, препятствуя при этом функционированию НКА в независимом от данных с НКУ и его поставщиков режиме. С целью создания задела под альтернативный сценарий функционирования орбитального сегмента во второй главе развивается концепция соответствующего дополнения процедуры функционирования орбитальной группировки ГЛОНАСС. Эта концепция включает создание самостоятельного набора алгоритмов, обеспечивающих повышение точности транслируемых эфемерид НКА в связанной с Землей системой координат за счет модернизации программных средств, привлечения располагаемых ГЛОНАСС бортовых аппаратных средств и сети автономных наземных станций. В итоге, развиваемая концепция предполагает реализацию на борту технологии высокоточного прогнозирования с последующим уточнением параметров вращения Земли. Соответствующие процедуры уточнения ПВЗ основаны на применении аппаратуры для генерации беззапросных и запросных измерений псевдодальностей до наземных станций и оптических терминалов. Развиваемая концепция требует решения ряда частных задач, возникающих при её реализации, а именно:

- обоснования выбора моделей, описывающих эволюцию ПВЗ, в том числе предназначенных для использования на борту НКА;
- оптимизации процедуры прогнозирования в смысле получаемой точности прогноза для различных временных интервалов (от суток до нескольких месяцев);
- разработки алгоритмов обработки измерений псевдодальностей между НКА и наземными станциями, содержащих значительное число различных погрешностей;
- снижения сложности вычисления частных производных измерений по оцениваемым ПВЗ, в том числе при реализации алгоритмов на борту НКА, а также минимизации требований к занимаемому объему памяти под перечисленные выше процедуры;
- обоснования состава и мест размещения задействованных наземных станций и терминалов, а также требуемого количества НКА для участия в соответствующем цикле;
- учета фактов синхронного влияния ошибок эфемерид и ошибок знания ПВЗ на получаемые измерения при их формировании и обработке.

Все предполагаемые трудности с некоторыми оговорками преодолены в рамках описываемого во второй главе прототипа технологического цикла, реализующего процедуры прогнозирования и уточнения ПВЗ на борту НКА ГЛОНАСС существующего и перспективного орбитальных сегментов. Этот прототип включает:

- усовершенствованную методику и алгоритмы прогнозирования ПВЗ с выбором вида аппроксимирующего полинома, длины интервала аппроксимации в зависимости от требуемой длительности прогноза и последующей

подстройкой по апостериорным данным авторегрессии (рис. 4);

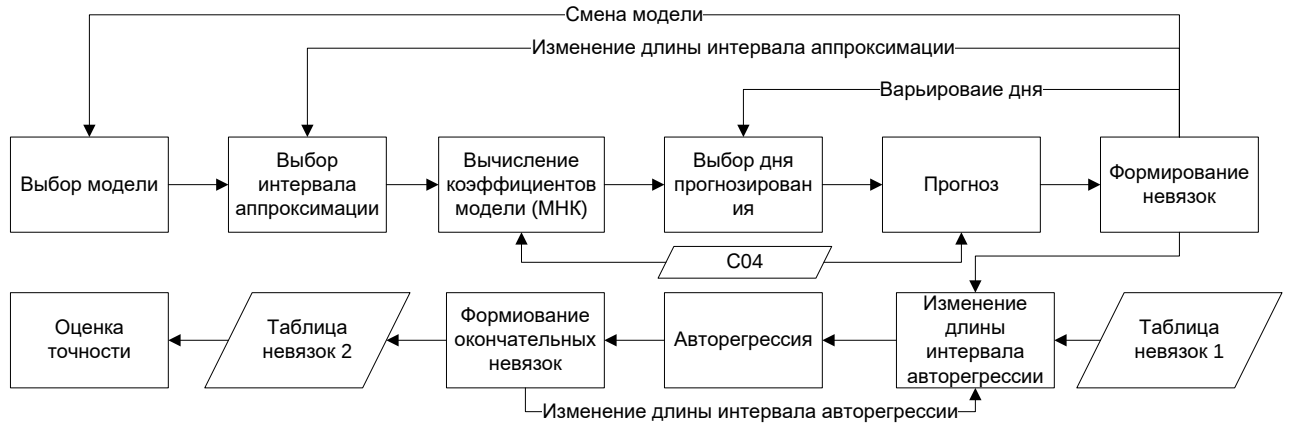


Рис. 4. Настройка процедуры прогнозирования ПВЗ.

– набор процедур для уточнения ПВЗ на борту НКА на основе использования аналитической связи обрабатываемых измерений псевдодальностей до наземных станций и компонент вектора ПВЗ в виде ее геометрической интерпретации различным способом (6) с последующей обработкой в МНК невязок между измеренными псевдодальностями и их расчетными аналогами.

$$\rho = f \left(\mathbf{A}_{CIRS}^{GCRS}(t_i) \cdot \mathbf{A}_{TIRS}^{CIRS}(t_i) \cdot \mathbf{A}_{ITRF}^{TIRS}(t_i) \cdot \mathbf{X}_{HC}^i(t_l), \mathbf{X}_{KA}^j(t_k) \right)$$

$$\rho = f \left(\mathbf{A}_{ITRF}^{TIRS} \left(x_p(t_l), y_p(t_l), DUT_p(t_l) \right) \cdot \mathbf{X}_{HC}^i(t_l), \mathbf{X}_{KA}^j(t_k) \right) \quad (6)$$

$$\rho = f \left(\mathbf{X}_{HC}^i(t_l), (\mathbf{A}_{ITRF}^{TIRS})^T \left(x_p(t_k), y_p(t_k), DUT_p(t_k) \right) \cdot \mathbf{X}_{KA}^j(t_k) \right)$$

где $\mathbf{X}_{KA}^j(t_k)$ – координаты j-го НКА в инерциальной СК в момент t_k получения сигнала с наземной станции, $\mathbf{X}_{HC}^i(t_l)$ – координаты i-й наземной станции в земной СК в момент t_l отправки сигнала, $x_p(t_l), y_p(t_l), DUT_p(t_l)$ – уточняемый вектор параметров вращения Земли (под частью всемирного времени $DUT_p(t_l)$ понимается его суточная эволюция), $\mathbf{A}_{CIRS}^{GCRS}$, $\mathbf{A}_{TIRS}^{CIRS}$, и $\mathbf{A}_{ITRF}^{TIRS}$ – матрицы преобразований между небесной и небесной промежуточной СК (с учетом движения небесного полюса), между небесной промежуточной и земной промежуточной (с учетом угла вращения Земли) и между земной промежуточной и земной связанной СК соответственно.

Разработанный прототип реализован в составе программного макета, отработка которого позволила провести анализ эффективности разработанных методик и алгоритмов на основе реальных данных ПВЗ. Таким образом, в качестве результатов во второй главе приводятся:

- полученные для различных интервалов наблюдения максимальные ошибки прогноза ПВЗ с вероятностью 0.95 и соответствующие им параметры «настройки» используемых алгоритмов (рис. 5);
- статистические характеристики точности оценки ПВЗ на борту НКА при обработке измерений псевдодальностей между НКА и наземными станциями, полученные при различных условиях проведения экспериментов: различном составе и уровне ошибок измерений, размещении, количестве станций и задействованных НКА;

– статистические характеристики эволюции получаемой ЭППД за счет погрешностей определения ПВЗ в режимах прогнозирования и уточнения.

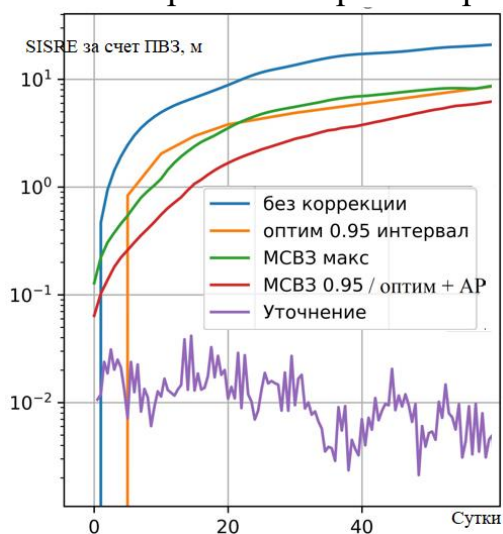


Рис. 5. Результаты прогнозирования и уточнения ПВЗ на борту НКА для 20 летнего интервала наблюдения («без коррекции» – ошибка из-за ухода ПВЗ, «оптим 0.95 интервал» – максимальная ошибка (0.95), полученная с применением описанных выше процедур подбора длины интервала и модели, «МСВЗ макс» – максимальная ошибка прогноза МСВЗ из бюллетеней А, «МСВЗ 0.95 / оптим + AP» – максимальная ошибка прогноза МСВЗ из бюллетеней А и описанные выше процедуры с добавлением авторегрессии (рис. 4), практически повторяют друг друга, «Уточнение» – максимальная ошибка (0.95) при уточнении ПВЗ на борту по измерениям согласно описанным выше методикам и алгоритмам)

В третьей главе обсуждается проблема совмещения процедуры прогнозирования и уточнения эфемерид НКА в инерциальном пространстве с процедурой прогнозирования и уточнения ПВЗ в интересах, во-первых, повышения точности транслируемых эфемерид и снижения итоговой (за счет эфемерид) величины SISRE ГЛОНАСС, и, во-вторых, реализации режима функционирования современных и перспективных орбитальных группировок ГЛОНАСС без загрузки данных с наземного комплекса управления. В результате совмещения упомянутых процедур формируются два независимых параллельно выполняемых технологических цикла. В первом – происходит регулярное решение задач по формированию высокоточных эфемерид в соответствии с методикой, описанной в главе 1. Во втором цикле применяются прогнозные значения эфемерид, подвергаемые периодической (между итерациями обработки измерений до наземных станций и формированием оценок ПВЗ) инициализации результатами первого цикла (рис. 6).

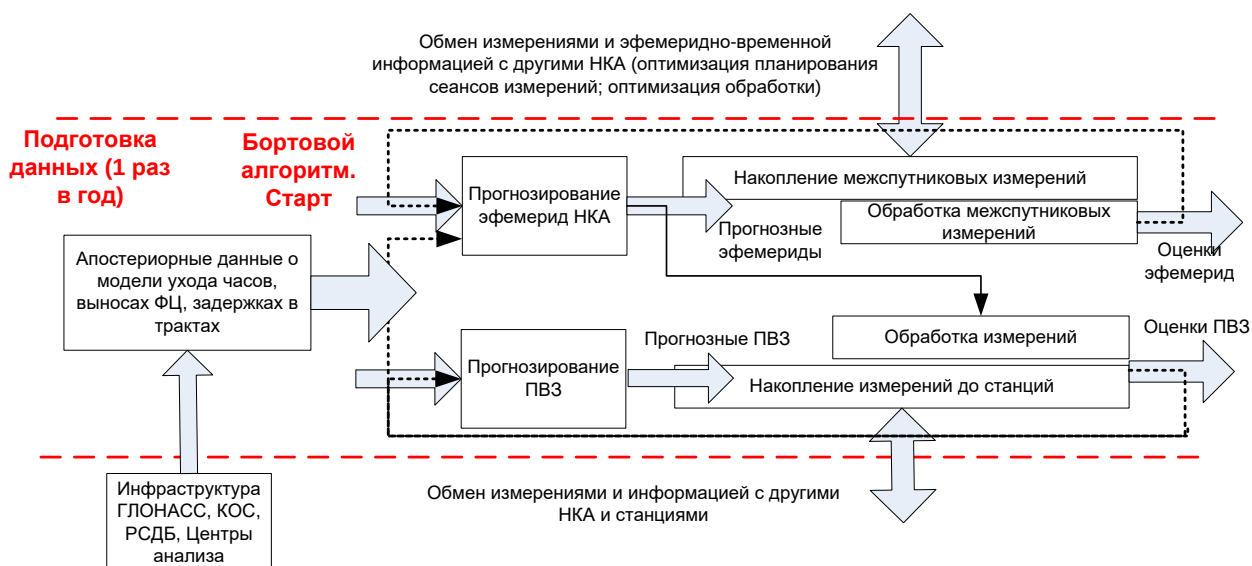


Рис. 6. Предлагаемый технологический цикл реализации совместных процессов уточнения эфемеридно-временной информации на борту НКА

В результате уточняются компоненты расширенного вектора состояния, включающего, помимо ПВЗ, погрешности знания эфемерид в орбитальной системе координат, представленные аппроксимирующей их моделью в виде гармонического выражения, позволяющего преодолеть фактическую ненаблюдаемость ПВЗ и эфемерид НКА при одновременном оценивании. Эффективность совмещения процедур прогнозирования и уточнения эфемерид НКА с точки зрения достигаемых характеристик точности продемонстрирована путем обработки измерений в совмещённом на борту процессе функционирования обоих технологических циклов, отработанном с использованием программного макета (рис.7).

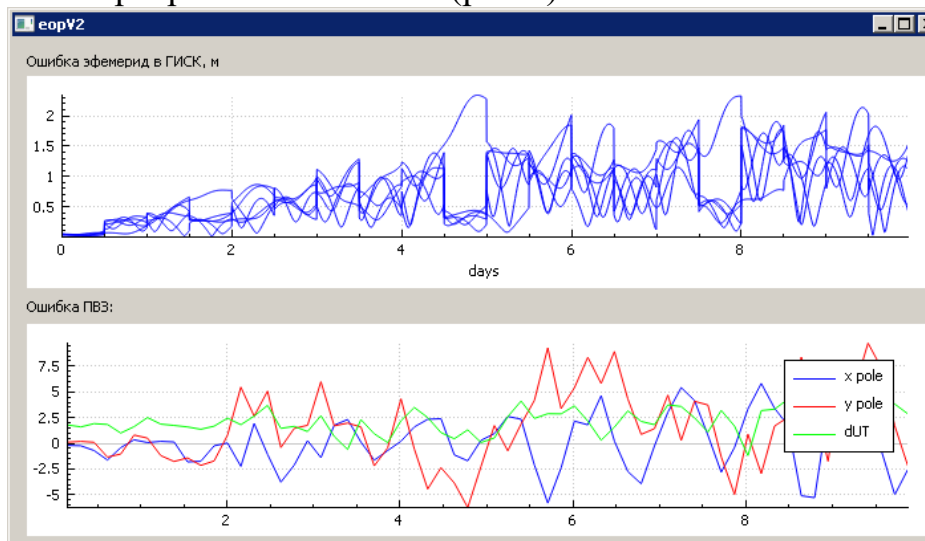


Рис. 7. Абсолютные ошибки эфемерид нескольких взаимодействующих друг с другом НКА и ПВЗ, сформированные на борту одного из НКА ОГ СВС.

Таким образом, показано, что итеративная задача одновременного уточнения эфемерид и ПВЗ имеет решение и обеспечивает высокоточные оценки как эфемерид в инерциальной СК, так и ПВЗ, то есть позволяет, таким образом, снизить SISRE в условиях длительного отсутствия закладок соответствующей информации с наземного комплекса (рис. 8).

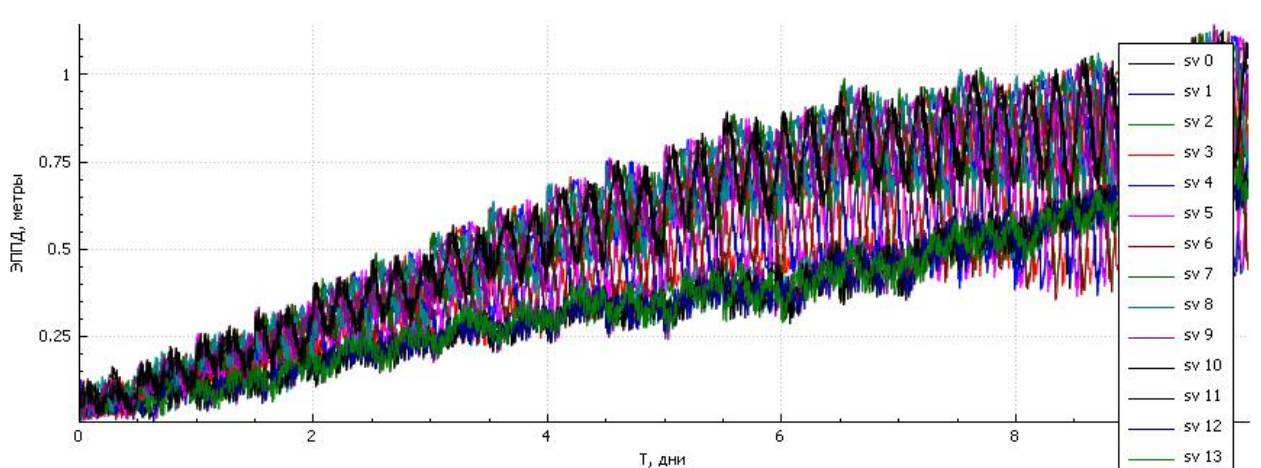


Рис. 8. Эквивалентная погрешность псевдодальности каждого НКА в ИСК, вызванная ошибками эфемерид и часов при обработке радиотехнических измерений и измерений МЛНСС

В четвертой главе обсуждаются проблемы, осложняющие реализацию описанных выше концепций, методик и алгоритмов. Речь идет о совокупности неконтролируемых факторов, влияющих на обработку различных типов измерений псевдодальностей между НКА, а также между НКА и наземными станциями. В качестве основных факторов, вносящих систематические погрешности в измерения и, тем самым, препятствующих получению потребной точности оценок, генерируемых с помощью различных численных методов, рассмотрены:

1. Уходы бортовых шкал времени спутников ГЛОНАСС-М, ГЛОНАСС-К и ГЛОНАСС-К2;
2. Задержки в приемно-передающих (далее-ПП) трактах аппаратуры при передаче сигналов в разных диапазонах;
3. Погрешности определения выносов фазовых центров антенных систем (ФЦ АС);
4. Погрешности распространения сигналов в атмосфере;
5. Погрешности совмещения различных систем координат, которые могут применяться в ГНСС и других связанных с ними системах в процессе получения требуемых данных.

Первый фактор обусловлен различием характеристик бортовых часов современных и перспективных НКА ГЛОНАСС и их существенным отставанием от конкурентных аналогов на «водороде». Данный факт приводит к необходимости использования в широком спектре навигационных задач частотно-временных поправок, определяемых в наземных центрах анализа путем непрерывной обработки траекторных измерений спутников ОГ. Таким образом, стремление улучшить SISRE «на порядок» требует соответствующего изменения графика определения и частоты закладок ЧВП на борт НКА ГЛОНАСС, превращая данную процедуру в многократно повторяемое за сутки мероприятие. Единственной возможностью снизить погрешность за счет уходов часов и, не увеличивая ресурсозатраты, сохранить независимость функционирования ОГ в таком случае является разработка альтернативного

сценария синхронизации бортовых шкал времени НКА с наземным стандартом, что сделать на основе только радиотехнических измерений не представляется возможным. В связи со сказанным в данной главе рассмотрен вариант применения и радиотехнической, и оптической бортовой и наземной аппаратуры, измерения которой обрабатываются в отдельных циклах в интересах снижения вызванной нестабильностью бортовой шкалы эквивалентной ошибки псевдодальности (как основного параметра процедур, описанных в главах 1 и 2) с субметрового до дециметрового уровня. В качестве основных средств решения данной частной задачи рассмотрена межспутниковая лазерная навигационно-связная система в виде бортовых и наземных терминалов (рис. 9) В работе предложена схема планирования и организации сеансов измерений с встраиванием соответствующих процедур в обсуждаемый в главе 3 технологический цикл функционирования НКА ГЛОНАСС.

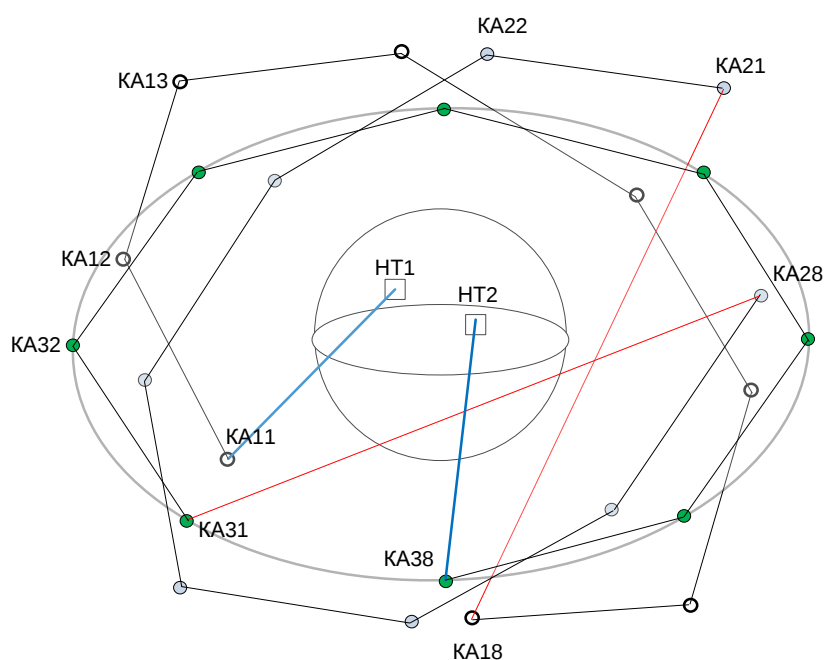


Рис. 9. Схема взаимодействия терминалов МЛНСС.

Как показывает анализ, второй и третий факторы имеют эквивалентный геометрический аналог в формируемой псевдодальности порядка метра, в то время как погрешность знания ПВЗ в единицу mas приводит к субметровому уровню ошибки. Таким образом, без дополнительных мероприятий в технологическом цикле оценивания ПВЗ по измерениям псевдодальностей вклад ошибок знания ПВЗ в формируемое измерение неразличим. Аналогичная проблема возникает при оценивании задержек сигнала в атмосфере, так как их величина может достигать десятков метров. Однако, как известно, задержку в ионосфере можно нивелировать почти полностью с помощью двухчастотного приемника ГЛОНАСС, а задержку в тропосфере – с помощью модели и измерений радиометра водяного пара, но, главным образом, обе задержки можно уточнить с использованием квантово-оптических систем (далее-КОС), либо с МЛНСС в связке с радиотехническими средствами. Для этого потребуется отдельная методика и набор процедур, выполняемых на

регулярной основе. В связи со сказанным решаемая в данной главе задача опирается на дополнительные технические средства оснащения станций и НКА, осуществляющих взаимодействие друг с другом. Поскольку в текущий момент нет общепринятых методик и средств, штатно используемых для определения задержек в ПП трактах и выносов ФЦ АС с высокой точностью, и не реализовано штатных технологических циклов по применению различных аппаратных средств в данных целях, в данной главе обсуждается выбор необходимых методов и средств, а также разработка методики оценки упомянутых погрешностей с их использованием. Предложена рекуррентная схема (рис. 10) поэтапного уточнения выносов ФЦ АС и задержек в ПП трактах на основе обработки измерений фактических значений псевдодальностей до станций и между НКА с привлечением высокоточной апостериорной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) и частотно-временных поправок (ЧВП) и последующим использованием полученных оценок обсуждаемых параметров во всех других технологических циклах функционирования орбитальных группировок ГЛОНАСС, описанных в первых трех главах. Результаты отработки представленной процедуры показали, что существует принципиальная возможность формирования оценок обсуждаемых параметров задержек и выносов ФЦ на сантиметровом уровне и последующего использования этих оценок на борту НКА как относительно постоянных величин.

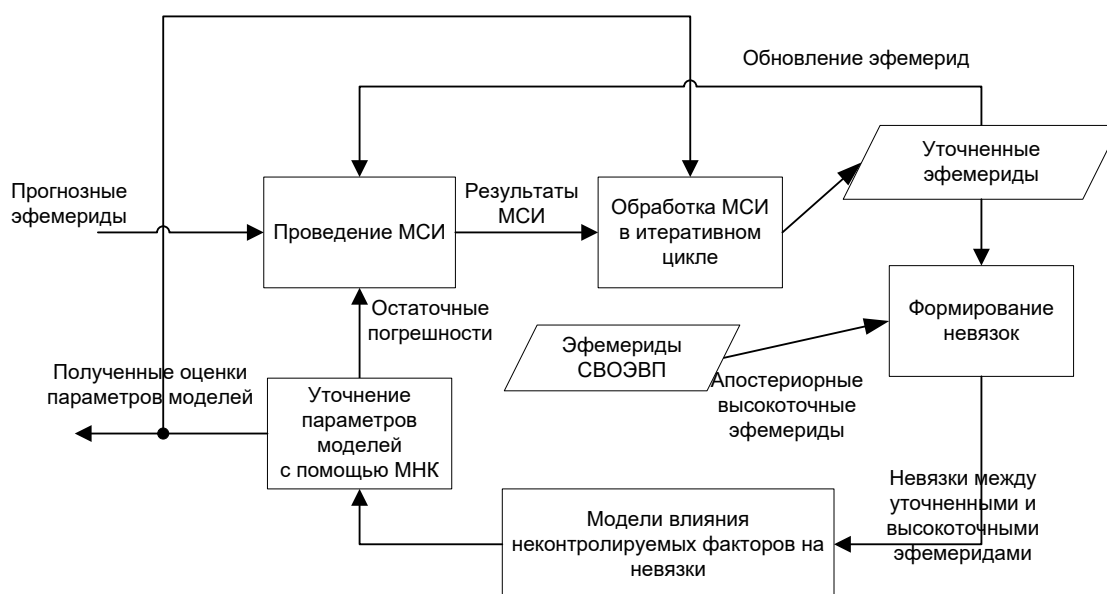


Рис. 10. Функциональная схема отработки алгоритма уточнения систематических ошибок измерений

В качестве дополнительного варианта улучшения точности определения необходимых параметров в данной главе рассмотрено привлечение дополнительной инфраструктуры, т.е. альтернативных средств и систем применительно к решению этой же задачи. Речь идет о более широком привлечении наземных и бортовых квантово-оптических систем и отечественных радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (далее- РСДБ).

Суть предлагаемого подхода состоит в разработке и реализации методики (рис. 11) проведения и обработки измерений псевдодальностей между НКА и наземными станциями КОС и РСДБ в интересах оценки следующих параметров: выносов ФЦ АС, задержки приема и передачи сигналов в бортовых радиотехнических трактах относительно бортовых синхронизирующих устройств (БСУ) и относительно КОС, рассогласования системы координат ГЛОНАСС и других связанных с Землей систем координат. Обработка результатов измерений с применением в методике высокоточных апостериорных ЭВИ и ЧВП показала, что существует принципиальная возможность создания специальных технологических циклов по уточнению параметров преобразования различных вариантов земных систем координат (ПЗ90, ITRF) на сантиметровом уровне и уточнения систематических составляющих погрешностей оценок выносов ФЦ, задержек сигналов и ошибок, обусловленных уходами бортовых часов, также на сантиметровом уровне.

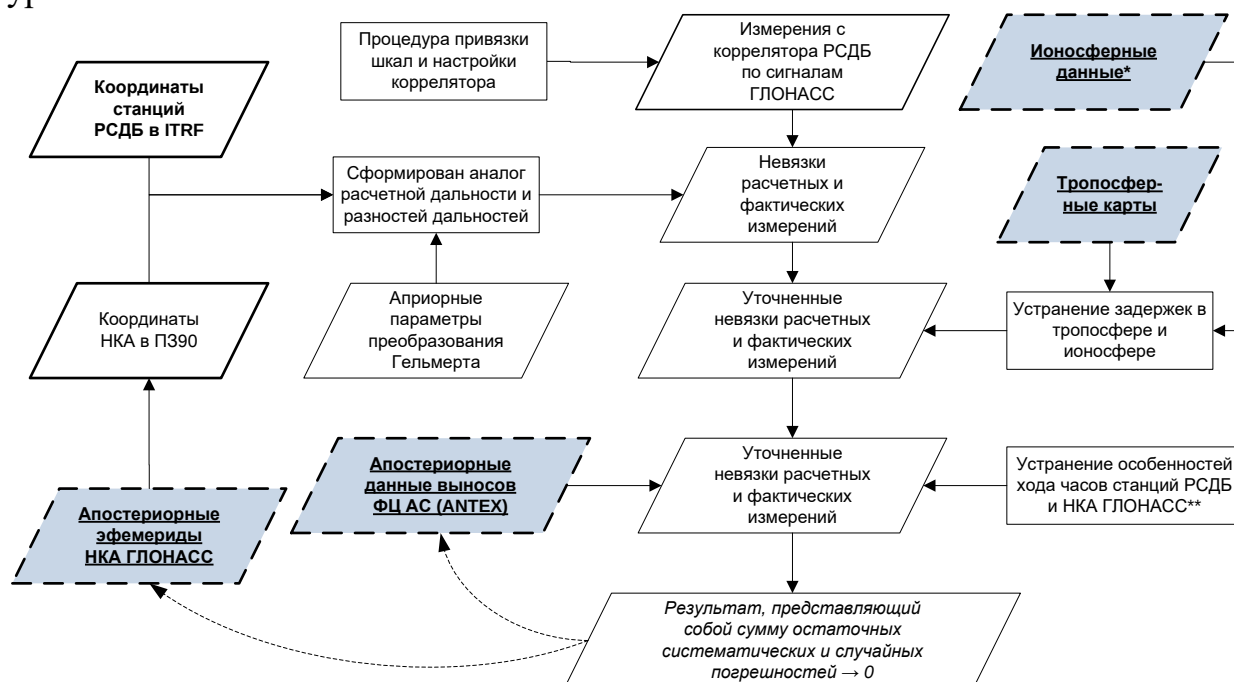


Рис. 11. Функциональная схема процедур в составе альтернативной информационной технологии совершенствования характеристик ГЛОНАСС

Реализованные процедуры геометрической интерпретации дальномерных измерений различных типов (ГЛОНАСС, КОС, РСДБ) с их последующей обработкой показали также возможность синхронизации с высокой точностью (рис. 12) устройств, функционирующих в системах различной инфраструктурной принадлежности, то есть использующих различающиеся шкалы времени. Данный факт позволяет значительно расширить спектр применения упомянутых систем в интересах совершенствования характеристик ГЛОНАСС. Показано, что с их помощью устранимы систематические ошибки, препятствующие получению высокоточных оценок перечисленных выше параметров в рамках реализации информационных технологий, описанных в главах 1-3.



Рис. 12. Невязки расчетных и измеряемых задержек сигналов ГНСС в измерениях РСДБ с учетом входящих в них различных погрешностей

Таким образом, в данной главе описаны:

- концепция улучшения точностных характеристик ГЛОНАСС в части последовательного улучшения показателя SISRE по каждому НКА на основе привлечения дополнительных измерительных средств, а также устранения ряда погрешностей и совершенствования способов синхронизации отечественной СК ПЗ90 с другими системами;
- методика, алгоритмы и результаты их отработки оценки выносов фазовых центров антенн и задержек в ПП трактах на борту НКА на основе использования апостериорной ЭВИ и ЧВП и фактических измерений псевдодальностей до станций и между НКА;
- методика, алгоритмы и результаты отработки процедур синхронизации бортовых шкал времени на основе использования измерений между наземными станциями/терминалами и НКА ОГ ГЛОНАСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен вариант решения комплексной научно-технической проблемы совершенствования потребительских характеристик ГЛОНАСС, связанная с необходимостью обеспечения кратного улучшения показателя SISRE до уровня конкурентных спутниковых навигационных систем. Рассмотрены текущие обстоятельства, в связи с которыми данный уровень еще не обеспечивается штатными технологическими циклами, аппаратными средствами и алгоритмами, применяемыми при эксплуатации ГЛОНАСС. Автором предложен вариант решения рассматриваемой проблемы с прицелом на длительную перспективу, основанный на использовании современных и перспективных бортовых и наземных радиотехнических и оптико-электронных аппаратных средств, с применением разработанных автором методик и алгоритмов. Их основное назначение: обеспечить снижение показателя эквивалентной погрешности псевдодальности (SISRE) ГЛОНАСС с текущего

уровня 1.4 м почти в три раза до значений 0,4-0,5 м и его последующее удержание в течение длительного периода времени ресурсами орбитальной группировки и некоторых наземных станций, функционирующих независимо путем реализации варианта технологического цикла нового облика. При этом совокупность предлагаемых методик и алгоритмов включает:

- методики и алгоритмы высокоточного прогнозирования движения центра масс НКА ГЛОНАСС, предназначенные для реализации на борту с учетом наличия неопределенных факторов и проявляющихся в канале движения особенностей каждого из действующих аппаратов, демонстрирующие погрешность прогноза на сутки не более 1 м в части итоговой ЭППД (0.95);

- методики и алгоритмы уточнения эфемерид НКА ГЛОНАСС в инерциальной СК на основе обработки межспутниковых измерений и обмена по межспутниковой линией данными, обеспечивающие погрешность определения эфемерид, соответствующую ЭППД 0.2 м (по уровню 0.95);

- методики и алгоритмы одновременной синхронизации шкал времени НКА ГЛОНАСС и наземных терминалов, сопряженных со шкалой времени системы, на основе применения современных оптических аппаратных средств;

- методики и алгоритмы совместного с эфемеридами определения на борту эволюции параметров вращения Земли на основе обработки измерений псевдодальностей до автономных наземных станций, позволяющие определить ПВЗ с погрешностью в единицы mas в режиме реального времени на борту НКА;

- вспомогательные информационные технологии и предназначенные для их применения в ГЛОНАСС соответствующие алгоритмы, обеспечивающие устранение широкого спектра неопределенных систематических погрешностей, связанные с использованием в интересах реализации перечисленных выше алгоритмов бортовых и наземных аппаратных средств. Рассмотренные погрешности включают выносы фазовых центров антенных систем, задержки в приемно-передающих трактах, а также погрешности синхронизации различных аппаратных средств относительно БСУ.

Разработанные в работе методики и алгоритмы рассмотрены и опробованы для примеров функционирования всех НКА средневысотного и НКА предполагаемого к развертыванию перспективного дополнительного сегмента ГЛОНАСС.

Разработан программный макет, включающий прототипы бортовых алгоритмов, предназначенных для переноса на борт НКА с целью реализации всех предлагаемых методик и алгоритмов, одновременно с этим предлагая широкий набор инструментов для проведения исследований с его помощью (вариабельность настроек методик и алгоритмов, состава и количества исходных данных, сценариев исследования), которые позволяют оценить эффективность вклада в конечный результат или уровень негативного влияния того или иного параметра рассматриваемых аппаратных средств или методик и алгоритмов.

Верификация полученных с использованием программного макета

результатов моделирования процессов функционирования ОГ ГЛОНАСС проведена на основе сравнения расчетов с апостериорными данными, содержащими эфемериды НКА ГЛОНАСС (СВОЭВИ), эфемериды QZSZ (для ВКК), ПВЗ (С04), ионосферные (все доступные модели) и тропосферные карты, РСДБ измерения (НПК СПП-ИПА РАН), выносы фазовых центров антенн (ANTEX); кроме того, учтены полученные на практике особенности сеансов проведения измерений БА и МЛНСС с точки зрения систематических и случайных погрешностей измерений в данных каналах (НПК СПП).

Развиваемый автором подход раскрывает сценарий дальнейшего развития ГЛОНАСС, способный обеспечить национальной системе лидирующую позицию с точки зрения точности, а также с точки зрения возможных перспектив развития космического сегмента ГЛОНАСС как независимо функционирующего узла информационных спутниковых систем России.

Списки работ, опубликованных автором по теме диссертации

Издания, входящие в международные реферативные базы данных (МРБД) и системы цитирования, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, зарегистрированные в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) и Российском центре научной информации (РЦНИ)

1. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Пасынков В.В. Современные задачи совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и перспективные методы их решения. 1. Совмещение систем координат, используемых различными информационными технологиями в интересах уточнения положения геоцентра // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 4. – С. 156-165.
Kruzhkov D.M. Krasil'shchikov M.N., Pasyнков 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 // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2019. – Vol. 58. №4. – P. 648–657. (Scopus, Web of Science)
2. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Пасынков В.В. Современные задачи совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и перспективные методы их решения. II. Совмещение систем координат, используемых различными информационными технологиями в интересах уточнения всемирного времени // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 5. – С. 108-116.
Kruzhkov D.M. Krasil'shchikov M.N., Pasyнков V.V. Current Problems of Improving the Coordinate-Time Support of GLONASS and Promising Methods for Their Solution: II. Alignment of Coordinate Systems Used by Various Information Technologies to Refine the Universal Time // Journal of Computer

- and Systems Sciences International. – 2019. – Vol.58. №5. – P. 766–773. (Scopus, Web of Science)
3. Акимов Е.В., Кружков Д.М., Якименко В.А. Концепция создания программно-аппаратного комплекса высокоточного координатно-временного обеспечения навигационного поля глобальных спутниковых систем // СТИН. – 2019. – № 9. – С. 17-21.
Akimov, E.V., Kruzhkov D.M., Yakimenko, V.A. High-Precision Simulation of Onboard Signal Receivers in Global Navigation Systems // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. №2. – P. 152–155. (Scopus)
 4. Акимов Е.В., Кружков Д.М., Якименко В.А. Реализация прототипа программно-аппаратного комплекса высокоточного координатно-временного обеспечения навигационного поля глобальных спутниковых систем // СТИН. – 2019. – № 9. – С. 21-24.
Akimov, E.V., Kruzhkov D.M., Yakimenko, V.A. Prototype Information System for High-Precision Navigation in Global Satellite Systems // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. №2. – P. 156–159. (Scopus)
 5. Гречкосеев А.К., Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Марарескул Т.А. Уточнение параметров вращения Земли на борту космических аппаратов. Концепция и информационная технология // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 4. – С. 125-135.
Grechkoseev A.K., Krasil'shchikov M. N., Kruzhkov D.M., Mararescul T.A. Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft Concept and Information Technologies // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2020. – Vol. 59. №4. – P. 598-608. (Scopus, Web of Science)
 6. Козорез Д.А., Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. анализ влияния неточности знания параметров вращения Земли на ошибки прогнозирования движения космических аппаратов. Исследование на примере аппарата LAGEOS-1 // СТИН. – 2020. – № 11. – С. 23-27.
Kozorez D.A., Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M. The Earth orientation parameters inaccuracy and spacecraft motion prediction errors. 1. LAGEOS-1 // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40 №12. – С.1128-1131. (Scopus)
 7. Козорез Д.А., Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. Анализ влияния неточности знания параметров вращения Земли на ошибки прогнозирования движения космических аппаратов. Исследование на примере КА GPS // СТИН. – 2020. – №11. – С. 27-30.
Kozorez D.A., Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M. The Earth orientation parameters inaccuracy and spacecraft motion prediction errors. 2. GPS // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. №12. – P.1132-1134. (Scopus)
 8. Козорез Д.А., Кружков Д.М., Кузнецов К.В., Мартынов Е.А. Исследование характеристик точности прогнозирования параметров вращения Земли с использованием метода наименьших квадратов // СТИН. – 2020. – № 11. – С. 19-23.
Kozorez D.A., Kruzhkov D.M., Kuznetsov K.V., Martynov E.A. Predicting the Earth orientation parameters by the least square method // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. №12. – С. 1124-1127. (Scopus)

9. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. К вопросу об автономном уточнении параметров вращения Земли на борту космических аппаратов. Анализ возможностей развиваемой информационной технологии // Космические исследования. – 2021. – № 5. – С. 408-417.
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. – Vol. 59. №5. – P.357-365. (Scopus, Web of Science)
10. Козорез Д.А., Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. К вопросу об уточнении параметров вращения Земли на борту космического аппарата ГЛОНАСС-ВКК // СТИН. – 2022. – № 4. – С. 6-9.
Kozorez D.A., Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M. Earth Orientation Parameters Onboard Refining at Glonass High-Orbit Segment // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42. №6. – P.603-606. (Scopus)
11. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Мартынов Е.А. Прогнозирование параметров вращения Земли в задачах навигации с учетом феномена эволюции неравномерности вращения Земли. // Космические исследования. – 2023. – № 4. – С. 322-331.
Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M., Martynov E.A. Predicting the Parameters of the Orientation of the Earth in Problems of Navigation Taking into Account the Phenomenon of the Development of Irregularity in the Earth's Rotation // Cosmic Research. – 2023. – Vol. 61. №4. – P. 324–332. (Scopus, Web of Science)
12. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Пасынков В.В. К вопросу о реализации информационной технологии уточнения эфемерид космических аппаратов ГЛОНАСС на основе использования перспективных аппаратных средств межспутниковых измерений // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2023. – № 4. – С. 50-58.
Krasilshchikov M.N., Kruzhkov D.M., M.N., Pasyнков V.V. On The Implementation of Information Technology for Refining the Ephemerides of GLONASS Spacecraft Based on the Use of Advanced Intersatellite Measurement Hardware // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2023. – №5. – P.147–159. (Scopus, Web of Science)
13. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Марарескул Т.А., Мартынов Е.А., Муратов Д.С. Совершенствование процессов планирования межспутниковых измерений в интересах повышения точности эфемерид современного и перспективных орбитальных сегментов ГЛОНАСС // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2023. – № 5. – С. 147-159.
Krasilshchikov, M.N., Kruzhkov D.M., Marareskul, T.A., Martynov, E.A., Muratov, D.S. Improvement of Intersatellite Measurements Scheduling to Refine the Accuracy of the Ephemerides of Modern and Prospective GLONASS Orbital Segments // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2023. – Vol.62. №5. – P. 903–913. (Scopus, Web of Science)
14. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Мартынов Е.А. Методы, средства и информационные технологии совершенствования характеристик ГЛОНАСС

// Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2024. – № 3. – С. 157-168.

Krasilshchikov M.N., Kruzhkov D.M., Martynov E.A. Methods, Tools, and Information Technologies for Improving GLONASS Characteristics // Journal of Computer and Systems Sciences International.– 2024. – Vol. 63.№3.–P. 510–520. (Scopus, Web of Science)

Другие публикации

- 15.Кружков Д.М., Пасынков В.В. Высокоточная навигация на основе информационных ГНСС-технологий. Ч.1. Математические основы. М.: Издательство МАИ, 2021. – 112 с. ISBN: 978-5-4316-0781-3.
- 16.Кружков Д.М., Пасынков В.В. Высокоточная навигация на основе информационных ГНСС-технологий. Ч.1. ГЛОНАСС – информационные технологии и алгоритмы решения навигационной задачи. М.: Издательство МАИ, 2021. – 113 с. ISBN: 978-5-4316-0813-1.
- 17.Кружков Д.М., Пасынков В.В. Отечественная глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС: особенности создания, развития и использования. М.: Издательство МАИ, 2022. – 112 с. ISBN: 978-5-4316-0884-1.
- 18.Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. К вопросу об автономном уточнении параметров вращения Земли на борту КА ГЛОНАСС / Сборник тезисов докладов Международного семинара «Навигация и управление движением». Под общей редакцией И.В. Белоконова. 28 сентября – 2 октября 2020 г., г. Самара, С.: Издательство Самарского университета, 2020 г., С. 66, ISBN: 978-5-7883-1530-0.
- 19.Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. К вопросу о повышении автономности функционирования ГЛОНАСС / Материалы XIV-ой Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления. 27 сентября – 2 октября 2021 г., с. Дивноморское, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2021 г., С. 91, ISBN: 978-5-9275-3851-5.
- 20.Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. Методы и средства совершенствования ГЛОНАСС на основе перспективных информационных технологий / XVI Всероссийская Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023), 11 сентября – 15 сентября 2023 г., г. Волгоград, г. Волгоград: Издательство ВолгГТУ, 2023 г., С.149, ISBN: 978-5-9948-4703-9.
- 21.Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. Методы, средства и информационные технологии совершенствования характеристик ГЛОНАСС / XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024), 17 июня – 20 июня 2024 г., г. Москва, г. Москва: ИПУ РАН, 2024 г., С.4160, ISBN: 978-5-91450-276-5.