

Отзыв
официального оппонента

доктора физико-математических наук Гаязова Искандара Сафаевича, заведующего лабораторией космической геодезии и вращения Земли Института прикладной астрономии РАН, на диссертацию Кружкова Дмитрия Михайловича, выполненную на тему: «Методы, алгоритмы и средства совершенствования ГЛОНАСС на основе перспективных информационных технологий», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Актуальность выбранной темы

Методы и средства определения геодинамических и геодезических параметров Земли существенно продвинулись с половины прошлого столетия, прежде всего, за счет создания и применения радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ), спутниковых лазерных дальномеров и геодезических приемников сигналов со спутников глобальных навигационных систем. В настоящее время точностные характеристики оценок величин, описывающих вращение Земли, вышли на пиковые значения своих уровней. Например, определение положения мгновенного полюса вращения Земли относительно его среднего значения на эпоху производится с ошибкой не более 0.05 миллисекунд дуги, что длительное время ранее казалось недостижимым. За таким прогрессом стоит многолетняя работа широкого круга специалистов, работающих в данной предметной области. Достигнутый на сегодняшний день результат в виде регулярного получения массивов данных о параметрах вращения Земли (ПВЗ) востребован в значительном количестве приложений. Глобальные навигационные спутниковые системы, включая отечественную систему ГЛОНАСС, являются одними из основных потребителей регулярно обновляемых и/или уточняемых геодинамических и геодезических данных. В частности, формирование обновлений эфемеридно-временной информации в центрах анализа и управления, осуществляемое специалистами по баллистико-навигационному обеспечению, может быть выполнено лишь с использованием данных о вращении Земли, в процессах которой есть выраженная неопределенность. Без этой информации полноценное функционирование орбитальных группировок спутниковых навигационных систем невозможно. При этом получение данных о вращении Земли, предоставляемых потребителям, весьма ресурсоемкий процесс, как с точки зрения времени, так и средств, привлекаемых для проведения различных типов наблюдений, их сбора и комбинированной обработки. Реализованной альтернативы в настоящий момент не существует. Одновременно с этим выдвигаются растущие требования к оперативности, автономности и точности эфемеридной информации на борту навигационного космического аппарата (НКА), которые заставляют искать альтернативные варианты функционирования бортовых алгоритмов и аппаратных средств. Таким образом, работа Д. М. Кружкова, в которой рассматривается сценарий формирования геодинамических параметров Земли, в частности, смещения полюса и вариаций длительности суток, на борту НКА за счет применения специального технологического цикла проведения измерений и обмена данными с сетью наземных станций, посвящена актуальной научно-технической проблеме, решение которой позволит расширить возможности отечественной спутниковой навигационной системы.



Целью рецензируемой диссертационной работы является повышение конкурентоспособности ГЛОНАСС за счет улучшения точностных характеристик транслируемой потребителям эфемеридно-временной информации и соответствующей ей эквивалентной погрешности псевдодальности на основе применения наземных и бортовых аппаратных средств, и создаваемых методик, и алгоритмов.

Научная проблема и новизна

В диссертации рассмотрена комплексная научная проблема реализации информационных технологий, включающих методики, алгоритмы, привлекаемые аппаратные средства и обlikовые представления технологических циклов их применения, обеспечивающих улучшение точностных характеристик ГЛОНАСС при текущей конфигурации наземных и бортовых аппаратных средств, а также при возможном появлении их перспективных дополнений. Соответствующая технология, как задумано соискателем, базируется на основе альтернативного подхода к построению процессов функционирования орбитальной группировки (ОГ) и наземных аппаратных средств, а также на методиках независимого (самостоятельного) формирования навигационным космическим аппаратом эфемеридно-временной информации, предназначенной для применения в задачах баллистико-навигационного обеспечения и последующей трансляции потребителю координат НКА.

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

- Разработаны модели, методики и алгоритмы формирования эфемеридно-временной информации на борту НКА, реализующие уточнение координат спутников ГЛОНАСС как в инерциальном пространстве, так и в земной системе координат с учетом определяемых в режиме реального времени смещения полюса и длительности суток (п.1,7,12) на основе применения аппаратуры для проведения межспутниковых радиотехнических измерений и измерений дальности до наземных станций;
- Разработаны вспомогательные методики и алгоритмы, обеспечивающие устранение разнородных неконтролируемых систематических погрешностей, препятствующих реализации предложенных алгоритмов определения эфемерид НКА, и опробованы на реальных данных с помощью созданного соискателем программного макета и прототипов бортовых алгоритмов (п.7,12,17).

Практическая значимость результатов исследования

Показаны реализуемость альтернативного сценария развития ГЛОНАСС, в котором могут быть использованы методики и алгоритмы формирования эфемеридно-временной информации без применения данных, собираемых центрами анализа с сети беззапросных измерительных станций, и возможность их внедрения на НКА ОГ ГЛОНАСС параллельно с основным технологическим циклом.

Получены уровни потенциально достижимых точностных характеристик определения эфемерид, ПВЗ, поправок часов НКА и, как следствие, эквивалентной погрешности псевдодальности, характеризующей качество навигационного поля, формируемого орбитальной группировкой при условии реализации предлагаемого соискателем подхода.

Создан в виде программного макета инструмент исследований и отработки различных вариаций исходных данных и параметров применяемых методик с целью получения

результатов, требуемых для эксплуатации орбитального сегмента ГЛОНАСС в части формирования эфемеридно-временной информации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность положений, выводов и рекомендаций соискателя базируется на применении общепринятых моделей, использовании общеизвестных закономерностей и, самое важное, подтверждается отработкой на реальных данных о вращении Земли и об эволюции траекторий движения исследуемых космических аппаратов. Достоверность результатов не вызывает сомнений. В частности, сформированные в результате реализации процедур прогнозирования зависимости точности получаемых оценок ПВЗ соответствуют ожиданиям и известным в данной предметной области уровням.

Структура работы определяется необходимостью разделения общей задачи на частные подзадачи.

Содержание работы. В первой главе обсуждается проблема формирования на борту эфемерид навигационных космических аппаратов, определяемых без привязки к Земле, в инерциальной системе координат. Рассмотрены концепция и алгоритмические основы новых технологических циклов, позволяющих уточнение эфемерид НКА в различных режимах функционирования ОГ. Несмотря на тот факт, что решение задачи прогнозирования движения НКА не является чем-то новым и соискателем рассмотрен общепринятый подход, при решении задачи производится адаптация данного подхода под существующее созвездие ГЛОНАСС в части подбора коэффициентов учета модели солнечного давления для каждого из НКА. Уточнение эфемерид на основе обработки межспутниковых измерений является менее распространенной задачей, решение которой можно было бы встретить в литературе. При этом соискателем предложен конкретный технологический цикл обмена данными, обработки измерений и определены потенциальные характеристики точности формируемых оценок эфемерид для различных временных отрезков в широком интервале дат, на котором были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Предложены алгоритмы определения эфемерид для потенциальных функциональных дополнений ГЛОНАСС, предполагаемых к развёртыванию на орбите, отличающейся от средневысотного сегмента. Описанный в диссертации подход к определению эфемерид можно считать традиционным и в то же время ориентированным на применение современных и перспективных бортовых и наземных средств, в полной мере используя их возможности в интересах улучшения точностных характеристик ГЛОНАСС.

Во второй главе описан подход к получению на борту сведений о параметрах вращения Земли в режиме реального времени без применения дополнительных источников информации, кроме тех данных, которые получаются в результате проведения сеансов измерений навигационных космических аппаратов с независимыми наземными станциями. Необходимо отметить, что методика формирования прогнозных рядов ПВЗ не нова и рассмотрена в значительном количестве работ, как, собственно, и задача уточнения рядов ПВЗ по радиотехническим измерениям НКА, проводимым сетью наземных станций. При этом новизной обладает идея инвертирования решения обсуждаемой здесь задачи уточнения ПВЗ с Земли на борт НКА, с учетом возникающих вместе с этим различных проблем, связанных с использованием отдельных станций вместо глобальной сети станций и центров анализа, закрытием спутниковой системы от возможности получения сторонней вспомогательной информации, наличием неустраняемых систематических

погрешностей и зависимостью величины ошибок ПВЗ от ошибок в эфемеридах. Тем не менее, в подобных условиях показана принципиальная возможность получения оценок ПВЗ с погрешностью, выражаемой единицами миллисекунд дуги, что в рамках решаемой задачи снижения ЭППД являлось бы достаточным.

В третьей главе обсуждается весьма интересная задача совместного уточнения на борту НКА эфемерид и параметров вращения Земли. Предложен облик технологического цикла функционирования ОГ, включающий описание порядка взаимодействия наземной и бортовой аппаратуры НКА ГЛОНАСС, алгоритмов, обеспечивающих формирование оценок эфемерид НКА, а также подходов к парированию неустраняемых систематических погрешностей. Обсуждаются особенности применения перспективной оптической аппаратуры, возможности которой позволяют, во-первых, обмениваться пакетами данных необходимого для функционирования всего цикла объема, во-вторых, парировать взаимные уходы шкал времени станций и аппаратов. Кроме того, показано, что при условии устранения ошибок, вызванных задержками в трактах и выносами фазовых центров антенных систем, удастся принципиально в одном цикле одновременно оценивать наряду с эфемеридами также и ПВЗ с достаточно высокой точностью, при которой уровень ЭППД находится на границе пары десятков сантиметров в первые сутки, что говорит о возможности улучшить достигнутый на текущий момент уровень точности навигации по ГЛОНАСС.

В четвертой главе обсуждается разработка информационных технологий, предназначенных для обеспечения возможностей реализации цикла совместного уточнения эфемерид и ПВЗ, описанного в третьей главе, за счет устранения существенных систематических погрешностей. В основе продвигаемой соискателем идеи лежит подход, включающий методики формирования предварительных наборов согласующих параметров, значения которых определяются разово и загружаются на борт НКА с целью последующего использования при обработке межспутниковых измерений и измерений до наземных станций. Также в главе рассмотрены вопросы задействования дополнительных технологий в интересах повышения точности ГЛОНАСС: рассмотрены измерения, сформированные на основе сигналов ГЛОНАСС с помощью РСДБ-антенн, измерения, выполненные с помощью квантово-оптических систем. С использованием таких измерений произведена отработка методик применения фактических данных об эфемеридах, ПВЗ, бортовых часах, выносах антенн, ионосферных и тропосферных картах. Сформированы рабочие процедуры, обеспечивающие сличение геометрических интерпретаций измерений и фактических их значений, собранных в экспериментальных сеансах. Отработка данных процедур сличения до минимального уровня невязок (единицы см) служит основой уточнения систематических погрешностей, по умолчанию не известных на борту НКА.

Замечания по диссертации:

1. Недостаточно полно представлена получаемая статистика прогнозирования ПВЗ по итогам применения авторегрессии.
2. Несмотря на обилие представленных материалов, недостаточно внимания уделено размещению ограниченного числа наземных станций для получения необходимой точности оценок ПВЗ на борту в процессе функционирования предлагаемого технологического цикла, а также анализу влияния их количества на точность оценок и скорость сходимости формируемого результата обработки измерений.

Отмеченные недостатки не снижают ценности проведенного исследования и не влияют на показанную принципиальную возможность реализации на практике развиваемого соискателем подхода к определению эфемеридно-временной информации на борту НКА. Структура и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Выполненная работа получила достаточную апробацию. Результаты исследований докладывались на научно-технических конференциях и опубликованы в 14 научных изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации научных работ. Материал изложен ясно с использованием большого количества иллюстраций и содержит необходимые ссылки на использованные источники. Положения, выносимые на защиту, в достаточной степени обоснованы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней»

На основе анализа содержания диссертации и автореферата можно утверждать, что представленное исследование является самостоятельно выполненным научным трудом, содержащим предложенный автором вариант решения актуальной комплексной научно-технической проблемы улучшения точностных характеристик отечественной системы ГЛОНАСС, вносящим существенный вклад в обеспечение конкурентоспособности ГЛОНАСС на международном уровне.

Диссертация удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Кружков Дмитрий Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
космической геодезии и вращения Земли
Института прикладной астрономии РАН

Гаязов Искандар Сафаяевич
«23» 09 2025 г.

Контактные данные:

e-mail: gayazov@iaaras.ru

тел.: + 7 (812) 275-10-24

191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт прикладной
астрономии Российской академии наук

Подпись официального оппонента Гаязова Искандара Сафаяевича заверяю:

Ученый секретарь ИПА РАН, д.т.н.

Л.В. Федотов

С отзывом
30.09.25

