

# МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛОНАСС

**М.Н. Красильщиков**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: mnkr@mail.ru

**Д.М. Кружков**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: kruzhkovd@mail.ru

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС, эфемериды, параметры вращения Земли, межспутниковые измерения, автономность, SISRE.

**Аннотация:** Рассматривается проблема совершенствования характеристик ГЛОНАСС в контексте современного конкурентного развития глобальных спутниковых навигационных систем. Авторы обозначают в качестве ключевых направлений соответствующих работ исследования и разработки, связанные, во-первых, с улучшением показателя SISRE в оперативном режиме за счет создания новых технологических циклов на борту космического аппарата и привлечения в эти процессы бортовых аппаратных средств, и, во-вторых, с формированием задела с последующей реализацией функциональных возможностей орбитальных группировок отечественной системы без загрузки эфемеридно-временной информации и частотно-временных поправок с наземного комплекса управления. В докладе рассмотрены основные факторы, препятствующие реализации в текущий момент намеченных целей, а также предложены пути устранения или нивелирования влияния этих факторов путем разработки и внедрения специальных информационных технологий использования современных и перспективных бортовых аппаратных средств, размещаемых на борту НКА ГЛОНАСС и его потенциальных дополнениях.

## 1. Введение

Современные глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), включая ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou, как системы двойного назначения интегрированы в народное хозяйство (транспорт, системы жизнеобеспечения и т.д.), а также в современные образцы 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 с точки зрения 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 и т.д. Проводимые мероприятия, в том числе, исследования и разработки, направленные на улучшение характеристик ГНСС, приводят также и к одновременному с этим усложнению процессов функционирования этих систем. В докладе обсуждаются одно из ключевых направлений совершенствования ГЛОНАСС, а именно: повышение точности навигации, в том числе «базовой», под которой авторы понимают точность навигации при использовании сигналов ОГ ГЛОНАСС без привлечения дополнительных средств и источников навигационной информации. Под ОГ ГЛОНАСС в докладе будем понимать не только средневысотный сегмент, но и перспективные его дополнения, такие, как высокоорбитальный космический комплекс (ВКК) и, возможно, геостационарные и низкоорбитальные дополнения. Действующим общепринятым критерием оценки точностных характеристик ГНСС на текущий момент принято считать эквивалентную погрешность псевдодальности (ЭПД), обусловленную только космическим сегментом, или SISRE, «Signal-in-space range error» [1]. Несмотря на свое определение в скалярной форме, данный критерий агрегирует целый ряд свойств и характеристик навигационной системы, которые являются результатом ее штатного функционирования как интегрированной системы, включающей не только орбитальный сегмент в виде навигационных космических аппаратов, но и ряд дополнений. В настоящее время уровень развития ГЛОНАСС таков, что к ухудшению SISRE прежде всего приводит рост ошибок эфемерид, оценок параметров вращения Земли и ухода часов, а также наличие различных неформулярных погрешностей в бортовой аппаратуре. Таким образом, стремление улучшить эксплуатируемую ГНСС требует разносторонней «работы» с целым рядом различных источников ошибок, которые являются следствием влияния на навигационную систему неконтролируемых факторов различной физической природы. Для этого предполагается совершенствование технологических процедур штатного функционирования ГЛОНАСС, задачей которого является вовлечение современных и перспективных бортовых и наземных аппаратных средств с целью повышения точности эфемерид и формирования эфемеридно-временной и частотно-временных поправок на борту каждого НКА орбитальной группировки, которые бы обеспечивали наилучший показатель SISRE в оперативном режиме и сохранение его на приемлемом уровне в режиме автономного функционирования, а также более высокую точность передаваемых в навигационном кадре потребителю эфемерид и поправок к бортовым шкалам времени и, в конечном итоге, наилучшую точность формируемого на Земле навигационного решения. Кроме того, в силу двойного назначения отечественной навигационной системы, немаловажной ее характеристикой был и остается обеспечиваемый уровень точности навигации при функционировании космического сегмента ГЛОНАСС в автономном режиме, под которым понимается полное отсутствие загрузки готовых высокоточных данных с наземного комплекса управления, и резервирование на борту НКА основных с точки зрения поддержания работоспособности орбитальной группировки но выполняемых силами НКУ процессов.

Подводя итог сказанному, можно констатировать актуальность решения задач, направленных на улучшение характеристик ГЛОНАСС, а именно: достижение более высокого уровня точности прогнозирования и/или определения в процессе штатного и не штатного (без загрузки данных с наземного комплекса управления) функционирования НКА параметров – данных, 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 относительно друг друга;
- значения выносов фазовых центров антенн во всех используемых частотных диапазонах (S, L);
- задержки в бортовой аппаратуре на различных частотах и по каждой литере.

## **2. Решение поставленных задач совершенствования характеристик ГЛОНАСС с целью устранения/нивелирования влияния неконтролируемых факторов**

### **2.1. Ошибки эфемерид НКА**

В докладе обсуждается развиваемая авторами концепция совершенствования процедур штатного и формирования процедур нештатного функционирования орбитальной группировки ГЛОНАСС. Эти процедуры характеризуются модернизацией соответствующих 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 уточнения эфемерид на борту НКА в рамках единой технологической цепочки. При этом процедуры уточнения эфемерид основаны на применении современных и перспективных аппаратных средств для проведения радиотехнических и оптических межспутниковых измерений, имеющих 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, устранения сопутствующих технических и технологических проблем. В докладе предлагается реализовать описываемый здесь технологический цикл функционирования ОГ в рамках двухэтапной процедуры, на первом этапе которой формируется высокоточный прогноз, алгоритм которого представляет самостоятельный результат работы авторов, а результаты прогноза используются на втором этапе для обработки измерений дальностей между НКА с учетом необходимых ограничений.

### **2.2. Проблема неопределенной эволюции ПВЗ**

В докладе обсуждается также проблема неопределенной эволюции параметров вращения Земли и влияние этой неопределённости на точность передаваемых потребителю эфемерид, итоговое значение ЭПД, а также точность прогнозирования эфемерид НКА при моделировании его движения в инерциальной системе координат. Обсуждаются современные и перспективные 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 значительных ресурсов, 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 режиме. С целью преодоления этой трудности в докладе обсуждается развиваемая авторами концепция совершенствования процедуры штатного и формирования процедуры нештатного функционирования орбитальной группировки ГЛОНАСС. Эта концепция включает создание самостоятельного набора алгоритмов, обеспечивающих повышение точности эфемерид на борту НКА в связанной с Землей системой координат за счет модернизации программных средств, привлечения располагаемых ГЛОНАСС бортовых аппаратных средств и сети специальных наземных станций. В итоге, развиваемая концепция предполагает реализацию технологии высокоточного прогнозирования и уточнения параметров вращения Земли на борту НКА. Соответствующие процедуры уточнения ПВЗ основаны на применении аппаратуры для формирования беззапросных и запросных измерений дальностей до наземных станций.

### **2.3. Совмещение задач уточнения эфемерид и ПВЗ на борту НКА ГЛОНАСС**

В докладе рассмотрена проблема совмещения процедур прогнозирования и уточнения эфемерид НКА в инерциальном пространстве с процедурой прогнозирования и уточнения ПВЗ в интересах, во-первых, повышения точности транслируемых эфемерид и снижения величины SISRE ГЛОНАСС в штатном режиме, и, во-вторых, реализации режима функционирования современных и перспективных орбитальных группировок ГЛОНАСС без загрузки данных с наземного комплекса управления. Предлагаемая процедура включает два независимых параллельно выполняемых технологических цикла. В первом происходит регулярное решение задач по формированию высокоточных эфемерид в соответствии с отдельной методикой, упомянутой в разделе 2.1. Во втором цикле применяются прогнозные значения эфемерид, подверженные периодической (между итерациями обработки измерений до наземных станций и формированием оценок ПВЗ) инициализации результатами первого цикла. 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 ненаблюдаемость ПВЗ и эфемерид НКА при одновременно оценивании. Эффективность предлагаемой концепции 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. 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 НКУ.

### **2.4. Устранение прочих неконтролируемых факторов**

В докладе рассмотрено также решение проблем, осложняющих реализацию описанных выше концепций, методик и алгоритмов. Речь идет о совокупности неконтролируемых факторов, влияющих на обработку различных типов измерений дальностей между НКА и 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:

- задержки в приемно-передающих (далее-ПП) трактах аппаратуры при передаче сигналов в разных диапазонах,
- погрешности определения выносов фазовых центров антенных систем (ФЦ АС),
- погрешности совмещения различных систем координат, которые могут применяться в ГНСС и других связанных с ними системах.

Решение обсуждаемой здесь задачи опирается на дополнительные технические средства оснащения станций и НКА, осуществляющих взаимодействие друг с другом. Поскольку в текущий момент нет общепринятых методик и средств, 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, авторами самостоятельно проделан выбор необходимых методов и средств, а также разработка методики оценки упомянутых погрешностей с их использованием. Предложена рекуррентная схема поэтапного уточнения выносов ФЦ АС и задержек в ПП трактах на основе обработки измерений фактических значений дальностей 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 разделах 2.1-2.3. В качестве дополнительного варианта решения поставленной в данной главе задачи рассмотрено привлечение дополнительной инфраструктуры, альтернативных средств и систем. 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 проведения и обработки измерений дальностей между НКА и наземными станциями КОС и РСДБ в интересах оценки следующих параметров: выносов ФЦ АС, уходов и флуктуаций бортовых шкал времени НКА, 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.

### 3. Заключение

В Заключении приведены результаты итогового анализа, демонстрирующие потенциальную возможность на основе развиваемого в работе подхода и использования предлагаемых информационных технологий получения следующей точности эфемерид, оценок ПВЗ и других параметров, определяющих, в конечном счете, достижение цели настоящего исследования, то есть показателей точности и доступности на уровне, обеспечивающем ГЛОНАСС лидирующую позицию среди конкурентных ГНСС, а именно: по показателю SISRE менее 1 метра в оперативном режиме, и менее 1.5 метров в течение месячного функционирования без загрузки данных с НКУ, менее 1 метра по ошибкам эфемерид в аналогичном режиме, ошибки единицы mas в определении ПВЗ по уровню 0.95, сантиметровые ошибки выносов ФЦ и эквивалентов задержек приема и передачи сигналов в бортовых трактах.

### Список литературы

1. [https://glonass-iac.ru/skph/fh\\_products/sisre/](https://glonass-iac.ru/skph/fh_products/sisre/) (дата обращения 18.01.2024).