

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, доцента Антоновича Константина Михайловича на диссертацию Кацура Артема Андреевича «Разработка и исследование алгоритмов оценивания текущих навигационных параметров спутников ГНСС по данным беззапросных траекторных измерений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.12.14 – «радиолокация и радионавигация»

### **Актуальность темы диссертации**

Целью диссертационной работы является повышение точности определения текущих векторов состояния и параметров движения спутников глобальных навигационных спутниковых систем по беззапросным фазовым траекторным измерениям, а также разработка алгоритмов, методик применения и программного обеспечения для прогнозирования векторов состояния в небесной координатной системе отсчета и сдвигов шкал бортовых часов. Эти данные необходимы в первую очередь для контроля навигационного поля, создаваемого спутниковыми навигационными системами. Применение зарубежных аналогов программного обеспечения оказалось нецелесообразным либо из-за отсутствия возможностей вести обработку данных по российской системе ГЛОНАСС, либо из-за невозможности определять параметры часов спутников, либо из-за их закрытости и очень высокой цены. Это привело соискателя ученой степени к созданию собственного программного обеспечения, в котором бы решались поставленные задачи. Исследования по данной тематике соответствуют приоритетному направлению развития навигационной системы ГЛОНАСС в рамках федеральной целевой программы «Концепция развития ГЛОНАСС в 2012-2020 годы», что говорит об актуальности диссертации.

### **Степень обоснованности научных положений; выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**

Для решения поставленной задачи диссертант определил требования к эфемеридно-временному обеспечению (ЭВО). Им сделан обзор существующего программного обеспечения для выполнения ЭВО, рассмотрены уравнения возмущенного движения с описанием моделей возмущающих сил, приведены уравнения наблюдений кодовых и фазовых псевдодальнестей, выполнена их линеаризация, указаны методы оценивания параметров движения навигационных спутников (НС) и пути повышения их точности.

Диссертантом подробно рассмотрены проблемы, возникающие при обработке измерений кодовых и фазовых псевдодальнестей. В частности,

рассмотрен учет факторов, определяющих точность траекторных измерений, в том числе влияние нейтральной атмосферы и ионосферы, многолучевости, приливных эффектов, ухода наземных и бортовых часов, задержки в трактах приемной и передающей аппаратуры, вариации в положениях фазовых центров антенн, включая эффект набега фазы wind-up. Большое вниманиеделено методу разрешения фазовой неоднозначности, а также обнаружению и компенсации потерь счета циклов непрерывной фазы по широкополосной, узкополосной и безионосферной комбинациям.

На основании этого анализа сделано **обоснование** методики и исследование алгоритмов оценивания параметров движения НС с целью повышения их эффективности. Это достигается за счет улучшения обусловленности матрицы нормальных уравнений и уменьшения погрешностей при численном интегрировании уравнений движения НС. С этой целью А.А. Карауш применил метод инструментальной переменной и масштабирования вектора решений.

Метод инструментальной переменной был разработан в первой половине прошлого века, но для целей космической геодезии и радионавигации **ранее не применялся**. Этот метод дает эффект, когда измерения содержат значительные случайные погрешности, а сами результаты измерений являются зависимыми. В этом случае обычное решение по методу наименьших квадратов (МНК) дает смещенные и несостоительные оценки. Использование А.А. Караушем метода инструментальных переменных привело к существенному повышению обусловленности системы нормальных уравнений, а, следовательно, к повышению точности определяемых начальных параметров движения (НПД) по сравнению с обычным оцениванием по МНК на 20 – 30%.

Для вычисления текущих векторов состояния НС был **обоснованно** выбран метода численного интегрирования Эверхарта. Решения Международного астрономического союза (МАС) о переходе на релятивистские земные и небесные координатные системы отсчета потребовало от автора введения в уравнения движения навигационных спутников соответствующих поправок, что также привело к повышению точности результатов.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается корректным применением известных математических методов, совпадением теоретических результатов с результатами математического моделирования и экспериментальным исследованием, сопоставлением полученных результатов с продуктами международных служб.

## **Практическая значимость**

Проведенные соискателем усовершенствования в разработанных алгоритмах оценивания параметров движения и методике обработки измерений, в частности, по разрешению неоднозначности фазовых измерений, устранению разрывов в непрерывной фазе, учету изменений в

световом давлении при прохождении спутников через тень Земли, учету релятивистских поправок привело к созданию совершенного программного обеспечения. Большим достижением соискателя является то, что созданное им программное обеспечение работает и дает результаты, сопоставимые с результатами, получаемыми известными научными программами типа Bernese, GAMIT, GIPSY OASIS. Считаю, что даваемая соискателем оценка уровня погрешностей определения положений спутников на орбите в 6 см является вполне обоснованной. Такая точность достаточна не только для контроля навигационного поля ГЛОНАСС и других ГНСС, но также для создания и контроля координатно-временного поля Российской дифференциальной системы СДКМ. Особое значение имеет использование разработок соискателя по определению параметров движения и шкал часов навигационных спутников для решения задач частотно-временного обеспечения, выполняемого Государственной службой времени и частоты (ГСВЧ).

## **Основные вопросы и замечания по работе**

1. В рассматриваемой диссертации затронут широкий круг вопросов, касающихся космической геодезии и радионавигации, небесной механики, вычислительной математики, терминологию в которых нельзя признать установившейся и общепринятой. К примеру, применяемый соискателем термин «навигационные параметры» относится к результатам измерений, в данном случае, кодовым и фазовым псевдодальностям, но не к векторам положения и скорости спутника, которые образуют «вектор состояния». Вместо термина «звездные параметры» следовало бы применять термин «параметры прецессии и нутации». Термин «вторая гармоника несферичности гравитационного поля Земли» следовало бы заменить на выражение «2-я гармоника разложения потенциала Земли в ряд по сферическим функциям».

2. Термин «система координат» в соответствии с ГОСТ Р 52572-2006 относится к набору математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства, то есть это чисто математическое, абстрактное понятие. Применявшийся долгие годы термин «система координат» (например, СК-42) теперь следует называть «координатной системой отсчета», а ее физическую реализацию из совокупности геодезических пунктов (или иных объектов – носителей координат) и соответствующих значений координат – «геодезической отсчетной основой».

3. Применяемый автором термин «неоднозначность фазы» нужно понимать как «начальная неоднозначность фазы», то есть она является общей для всех измерений мерной дуги, а не для каждого измерения. Иначе это приводило бы к дефекту ранга системы уравнений.

4. Принятое на стр. 84 значение эксцентриситета  $e = 1$  (параболическая орбита) вместо  $e = 0$  (круговая орбита), вероятно, является опечаткой, так как

иначе никакие расчеты бы не получились, поскольку в этом случае спутник улетает в космос.

5. Имеются и другие неточности, как, например, «ось является векторным произведением» (стр. 22), «линеаризация невязок дальности» (стр. 31).

6. На стр. 43 отсутствует расшифровка обозначений к уравнениям (2.3), (2.4).

7. На стр. 49 утверждается, что ионосферосвободная комбинация фазы свободна от влияния ионосферы. Это не так, несмотря на название. А эффективная длина волны в 6 мм значительно перекрывает уровень шума.

8. На стр. 50 в таблице 2.1 не приведена дискретность измерений.

9. В уравнении на стр. 73 не указаны критерии сходимости итеративного решения.

10. На стр. 94 неясно, учитывались ли изменения в тропосферной влажной зенитной задержке, в параметрах вращения Земли.

Тем не менее, считаю, что приведенные выше замечания и вопросы не умаляют общей ценности работы.

## **Общее заключение по диссертации**

Диссертация А.А. Кауаша состоит из одного тома, содержащего 125 страниц текста. Структурно она подразделяется на введение, 4 главы, заключение и список литературы из 126 названий, из них 80 на английском языке. Имеется также два приложения на 9 страницах. По теме диссертации у соискателя имеется 23 публикации, из них 6 – в изданиях по перечню ВАК. Две публикации выполнены самостоятельно, остальные – в соавторстве.

**Автореферат диссертационной работы полностью соответствует основным положениям диссертации.**

Полученные автором **результаты являются новыми, достоверными и научно обоснованными**, а также не вызывают сомнений в самостоятельности соискателя. Диссертация Кауаша А.А. «Разработка и исследование алгоритмов оценивания текущих навигационных параметров спутников ГНСС по данным беззапросных траекторных измерений» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, которая обладает внутренним единством и содержит новые научно обоснованные технические решения и разработки в области радионавигации для повышения точности контроля навигационных полей ГНСС. На основании выполненных автором исследований решена имеющая существенное значение для развития страны задача повышения точности контроля навигационных полей ГНСС, внедрение которой вносит значительный вклад в области эффективного использования спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС (Россия), GPS NAVSTAR (США), Бэйдоу (Китай), Галилео (ЕС), Российской дифференциальной подсистемы СДКМ, а также способствует выполнению частотно-временных определений Государственной службы времени и частоты.

В тексте диссертации имеются ссылки на авторов и источники всех заимствованных материалов.

Диссертационная работа Кауаша А.А. соответствуют критериям п. 9, приведенным в «Положении о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, утвержденного Постановлением Правительства РФ от № 842 от 24.09.2013 г.

Таким образом, Кауаш Артем Андреевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – «радиолокация и радионавигация».

Официальный оппонент  
д-р техн. наук, доцент

Антонович К.М.

Ученый секретарь  
Ученого совета СГУГИТ

Соболева Е.Л.



17.01.2017г.

Информация об оппоненте:

Доктор технических наук, доцент Антонович Константин Михайлович

Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

Структурное подразделение: кафедра физической геодезии и дистанционного зондирования

Должность: профессор-консультант

Почтовый адрес: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10

Телефон служебный: (383)3-61-01-59

Электронный адрес: E-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация оппонента: 25.00.32 – «Геодезия».