

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Али Джепе  
«Задача навигации и ориентации искусственного спутника Земли на  
основе датчиков угловой скорости и многоантенного спутникового  
приемника»,

представленную на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности

01.02.01 – Теоретическая механика

Диссертационная работа Али Джепе посвящена исследованию и решению важной прикладной задачи – определению навигационных параметров искусственного спутника Земли, навигационный комплекс которого содержит датчики угловой скорости и многоантенный приемник спутниковых навигационных систем (СНС) ГЛОНАСС/GPS. Многоантенные приемники СНС все чаще используются для навигации подвижных объектов. Цель проводимых исследований – построение и обоснование унифицированных алгоритмических решений определения навигационных параметров спутника с помощью интеграции данных датчиков угловой скорости и многоантенных СНС.

Диссертация содержит 6 разделов, 95 страниц, 9 рисунков, список литературы, в котором 44 наименования.

Первый раздел назван «Введение». В нем обосновывается актуальность темы. Формулируются две задачи. Одна из них – определение траекторных параметров движения характерной точки спутника, например, точки установки базовой спутниковой антенны. Вторая задача – определение параметров ориентации спутника. Под решением задачи подразумевается разработка алгоритмов вычисления параметров движения и ориентации спутника по информации датчиков угловой скорости и многоантенного приемника СНС. Отмечается, что алгоритмы разрабатываются для малого искусственного спутника Земли, находящегося на удалении порядка 1500 км от ее поверхности.

На такой высоте в измерениях приемника СНС практически отсутствуют погрешности распространения в слоях ионосферы и тропосферы, погрешности многолучевости также не проявляются. Проводится обзор литературы, в которой исследуется применение данных приемника СНС для измерения траекторных параметров и ориентации искусственного спутника Земли.

Второй раздел диссертации посвящен исследованию задачи определения траекторных параметров движения малого спутника при помощи первичных спутниковых измерений. Поставленная задача ставится аналогично задаче коррекции в инерциальной навигации. Роль модельных уравнений выполняют уравнения движения искусственного спутника Земли, записанные в осях подвижной гринвичской системы координат. Вектор состояния включает в себя погрешности координат и составляющих вектора скорости спутника в начальный момент времени, а также постоянные составляющие внешних возмущающих сил рассматриваемой динамической системы. Информация приемника СНС используется в качестве корректора. Выписываются линеаризованные уравнения ошибок траекторных параметров спутника и линеаризованные уравнения корректирующих измерений. Полученная задача решается методами калмановской фильтрации.

В работе сравниваются между собой несколько вариантов использования информации приемника СНС для коррекции. В одном из вариантов в качестве корректора выступают вычисленные в приемнике СНС значения координат и вектора относительной скорости. Спутниковый приемник производит вычисления траекторных параметров, если находится в зоне видимости его антенны по крайней мере 4 навигационных спутника.

В другом варианте в качестве корректирующих измерений выступают первичные спутниковые измерения, включающие в себя кодовые псевдодалности и доплеровские псевдоскорости от видимых навигационных спутников. Для исключения неизвестной погрешности часов приемника СНС предлагается использовать первые разности первичных измерений. В работе рассматривается также вариант одновременного использования измерений

навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. При этом для исключения учета дробной части расхождения шкал времени ГЛОНАСС и GPS формируются первые разности измерений только между измерениями навигационных спутников ГЛОНАСС и отдельно между измерениями навигационных спутников GPS.

Работа предложенных алгоритмов определения траекторных параметров малого спутника изучается с помощью моделирования. За основу численного моделирования выбраны характеристики движения спутника «Университетский-Татьяна-2». В работе промоделированы движения навигационных спутников систем ГЛОНАСС и GPS, движение малого спутника, получение первичных спутниковых измерений и вторичной спутниковой информации, алгоритмы калмановской фильтрации. Приведенные результаты обработки данных позволяют сравнить различные варианты использования корректирующей информации и оценить точность определения траекторных параметров малого искусственного спутника Земли. Представленные в графическом виде результаты моделирования показывают, что использование для коррекции первых разностей спутниковых измерений приводит к улучшению точности определения навигационных параметров малого спутника даже при наличии малого количества спутниковых измерений, недостаточного для решения навигационной задачи в приемнике СНС.

Третий раздел называется «Задача определения параметров ориентации малого спутника при помощи датчиков угловой скорости и разнесенных спутниковых антенн». Для составления алгоритма решения задачи из заголовка раздела вводится модельный трехгранник, который является числовым образом трехгранника, связанного с корпусом малого спутника. Вводится вектор малого поворота, характеризующий взаимную ориентацию модельного трехгранника и приборного, оси которого направлены вдоль осей чувствительности датчиков угловой скорости. Изменение вектора малого поворота подчиняется линейному кинематическому уравнению, в котором присутствуют измерения датчиков угловой скорости вращения малого спутника.

В качестве корректора выступает информация, получаемая от приемника СНС с разнесенными антеннами. В данной задаче также рассматриваются несколько вариантов использования спутниковой информации. В одном из них корректирующими измерениями являются навигационные решения приемника СНС. Измерения формируются на основе известных в системе координат, связанной с корпусом малого спутника, векторов разнесения антенн приемника СНС и дифференциальных комбинаций спутниковых данных, полученных с помощью различных антенн. Вектор состояния включает в себя компоненты вектора малого поворота между трехгранниками и постоянные составляющие дрейфов датчиков угловой скорости. Задача сводится к задаче оценивания фазового вектора линейной динамической системы при помощи измерений линейных комбинаций его компонент. После принятия определенных гипотез о параметрах шумов в системе и измерениях для решения задачи применяется алгоритм оценивания калмановского типа.

В работе проводится анализ наблюдаемости поставленной задачи оценивания. Для этого осуществляется переход к безразмерным переменным порядка единицы. При нормализации вводится малый параметр, во всех слагаемых рассматриваемой модели выделяется множитель, пропорциональный некоторой степени малого параметра. Анализ наблюдаемости производится с использованием упрощенной модели, в уравнениях которой сохранены только слагаемые, пропорциональные минимальной степени малого параметра.

Во втором варианте коррекционная модель основана на первых разностях фазовых измерений. Комбинации целочисленных фазовых неопределенностей включаются в вектор состояний. Автор предлагает методический прием для исключения целочисленных фазовых неопределенностей. Сначала с помощью фильтра Калмана вычисляются плавающие значения фазовых неопределенностей, далее для нахождения их целочисленных значений применяется известный по литературе LAMBDA метод. После исключения из корректирующих измерений вычисленных целочисленных фазовых

неопределенностей вновь применяется калмановская фильтрация для определения ориентации объекта.

Работоспособность и эффективность предложенных алгоритмов подтверждаются с помощью моделирования. Результаты работы алгоритмов приводятся в графическом виде.

В четвертом разделе проводится исследование зависимости точности оценивания параметров редуцированных алгоритмов определения ориентации малого спутника от смещений, присущих в базовых векторах. Основываясь на понятии стохастической меры оцениваемости, выполняется стохастический анализ точности редуцированных моделей. Смещения в координатах базовых векторов вызваны вектором малого поворота между приборной системой координат, связанной с осями чувствительности датчиков угловой скорости, и системой координат с осями, направленными вдоль базовых векторов многоантенного приемника СНС.

Предполагается, что координаты базовых векторов известны с некоторыми ошибками, которые вносятся в вектор состояния. Далее строится алгоритм фильтрации с расширенным вектором состояния и редуцированный алгоритм без учета неточности знаний координат базовых векторов. Для анализа расхождений между результатами работы алгоритмов вводятся понятия абсолютной меры оцениваемости, характеризующей предельные точностные возможности оценивания переменных полной модели, и истинной меры оцениваемости в качестве характеристики точностных возможностей редуцированного алгоритма.

С помощью моделирования анализируются характеристики полного и редуцированного алгоритмов оценивания и соответствующие стохастические меры оцениваемости. В результате обосновывается потенциальная возможность оценивания смещений при помощи разработанного алгоритма и возможность использования редуцированного алгоритма при относительно малых смещениях в координатах базовых векторов. Ковариационный анализ показал малую чувствительность алгоритма к ошибкам задания длины базового

вектора и большую чувствительность к ошибкам перпендикулярным направлению базового вектора.

Раздел 5 содержит заключение.

Все основные результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми. Обоснование получаемых результатов проводится с помощью применения методов математического моделирования, теории инерциальной и спутниковой навигации, а также методов теории фильтрации и оптимального оценивания.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации опубликованы в 8 работах автора, 2 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций.

В качестве замечаний по диссертационной работе Али Джебепе отмечу следующее.

1. Предложенный в работе алгоритм использования первичных измерений приемника СНС для определения траекторных параметров малого искусственного спутника Земли представляет самостоятельный интерес и эффективен при малом количестве видимых навигационных спутников. Однако на высоте порядка 1500 км над поверхностью Земли сфера обзора малого спутника расширяется. Использование многоантенного приемника СНС приводит к увеличению числа видимых навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. Поэтому возникновение случая, когда видимых спутников на протяжении нескольких минут менее необходимого количества для решения задачи навигации приемником СНС, достаточно маловероятно.

2. В разделе 2 диссертации для проведения качественного анализа наблюдаемости вводится малый параметр, и в уравнениях осуществляется переход к безразмерным переменным. Обычно при нормализации уравнений малый параметр вводится в виде отношения равноразмерных параметров. В данном случае малый параметр искусственно вводится из анализа характерных значений параметров на рассматриваемых движениях малого спутника. В

результате запись соотношения, например, (74) становится некорректной: в левой части соотношения находится размерная величина, а в правой – безразмерная.

Отмеченные недостатки не снижают ценности выполненной работы и не влияют на ее результаты. Диссертационная работа является законченным научным исследованием, содержит новый подход к разработке программно-математического обеспечения навигационного комплекса искусственных спутников Земли.

Работа полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Али Джепе, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

Официальный оппонент – заместитель начальника НИО-9  
Государственного научного центра Российской Федерации  
ОАО «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова»,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник

*И.А. Копылов*  
01.09.2016

Копылов Игорь Анатольевич

Контактные данные – телефон: (495) 556-55-20, e-mail: [igiirada@mail.ru](mailto:igiirada@mail.ru)

Подпись И.А. Копылова удостоверяю.

Первый заместитель Генерального директора по науке – начальник НИЦ «ОАО  
«ЛИИ им. М.М. Громова», кандидат технических наук



В.В. Цыплаков