

# ТУСУР

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

ОКПО 02069326, ОГРН 1027000867068,  
ИНН 7021000043, КПП 701701001

тел: (382 2) 510-530  
факс: (382 2) 513-262, 526-365  
e-mail: [office@tusur.ru](mailto:office@tusur.ru)  
http:// [www.tusur.ru](http://www.tusur.ru)

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

В Диссертационный совет Д 212.233.05 ГУАП

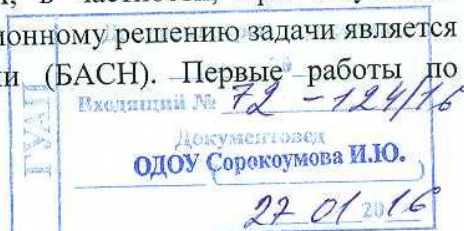
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А,  
Санкт-Петербург, 190000

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Н.В. Михайлова  
«Автономная навигация космических аппаратов с использованием  
спутниковых радионавигационных систем»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»**

В процессе эксплуатации космических аппаратов (КА), обеспечивающих решение разнообразных научно-технических задач в области космических телекоммуникаций, мониторинга земной поверхности и ряда других существует реальная потребность как в изменении (или коррекции) их орбит, так и в достаточно точной абсолютной пространственно-временной привязке получаемой на борту технологической информации. В обоих случаях необходимо иметь значения трех текущих координат КА и трех составляющих скорости его движения в некоторой опорной системе координат с привязкой этих данных к системной шкале времени. Следует также отметить, что за последние годы значительный научный интерес обозначен к проблеме обеспечения высокоточной относительной навигации при согласованном групповом движении нескольких малых КА.

Традиционная методология решения задачи навигации и управления КА, основанная на использовании сети наземных командно-измерительных комплексов, оказывается затратной, как в части эксплуатационной, так и в части доступности ее использования на произвольном участке орбиты КА, в частности, при отсутствии видимости КА с территории РФ. Альтернативой традиционному решению задачи является применение бортовых автономных систем навигации (БАСН). Первые работы по





изучению особенностей функционального построения этих систем, обоснованию технико-экономических требований и исследованию достижимых технических показателей были опубликованы в конце 80-х начале 90-х годов прошлого века. Их количество за последние годы стремительно возрастает. Большая часть публикаций в виде монографий и/или научных работ на соискание ученых степеней представлена в зарубежных источниках, в нашей стране их насчитывается не более десятка.

Следует отметить, что полноценный комплексный подход к задаче проектирования и обоснования функционального построения БАСН связан с привлечением знаний не только в области теории построения радионавигационных систем, но и в прикладной астрономии, баллистике и теории организации вычислительных процессов. В связи с этим методологические вопросы проектирования БАСН весьма важны для теории и практики построения этих систем. Именно они находятся в центре внимания диссертации Н.В. Михайлова. Они приобретают особое значение в условиях ограничений на проектирование БАСН для коммерческих проектов, когда исключено применение элементной базы военного назначения, и когда показатель экономичности разработки является едва ли не ведущим показателем на рынке систем космической радионавигации.

Диссертационная работа Михайлова Н.В. по существу охватывает все методологические аспекты сложной и важной научно-технической проблемы разработки БАСН. В ней изучены и систематизированы как системные технологические проблемы, связанные с созданием радиационно-стойкой элементной базы, включая проблемы и пути достижения приемлемых по стоимости технических решений, так и теоретические проблемы программно-алгоритмической обработки сигналов в вычислителе БАСН.

В первых трех главах диссертации выполнен анализ условий функционирования БАСН на разных типах орбит КА, рассмотрены различные архитектуры функционального построения навигационного приемника с многоканальным программным коррелятором и выполнен их сравнительный анализ. В этой части работы выполнен анализ особенностей реализации процедур параллельного и последовательного поиска сигналов навигационных КА (НКА) в программном приемнике БАСН с учетом динамики изменения временной задержки и частотного сдвига навигационных сигналов на различных типах реальных орбит КА, предложен алгоритм комбинированного поиска. При этом решающая статистика формируется на основе усеченной последовательной процедуры Вальда, которая предполагает задание начального порога для заданных вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода и вычисление в реальном времени скорости его изменения. Автором получены новые аналитические соотношения для расчета параметров алгоритмов поиска, в которых используется усеченная последовательная процедура Вальда.

Представляет интерес, описанный в 3 главе эффективный метод оптимального динамического распределения вычислительных ресурсов сигнального процессора (метод SoftFlex), который учитывает избыточную помехоустойчивость в некоторых каналах приема и адаптивно изменяет число параллельных каналов приема сигналов за счет уменьшения объема данных, поступающих в вычислитель по каналам с высоким отношением С/Ш. Программный многоканальный коррелятор содержит новые дополнительные функциональные блоки, в частности, измеритель загрузки процессора и блок управления коррелятором. В главе 3 получены новые расчетные соотношения для проектирования БАСН с использованием метода SoftFlex и приведена методика их применения. Снижение энергетических потерь, обусловленное возможным укорочением длительности дальномерного кода, предложено компенсировать в режиме когерентного



слежения за фазой сигнала несущей частоты путем вычисления среднего значения укороченных корреляций на нескольких интервалах.

Четвертая глава работы посвящена разработке и исследованию алгоритмов вторичной обработки информации. Здесь автор вполне обоснованно акцентирует исследования на разработке алгоритма оценки навигационного вектора для экстремальных условий работы БАСН, имеющих место при движении КА на геостационарной орбите (ГСО). Они обусловлены дефицитом числа видимых НКА, высокой величиной геометрического фактора и низким уровнем параметра  $C/N_0$ . В главе выполнен аналитический обзор известных алгоритмов обработки и предложен вариант построения фильтра, в котором формируются разностные наблюдения псевдодалности и псевдоскорости, образованные по сигналам двух и более НКА относительно одного из них (опорного), и выполняется совместная обработка оценок, получаемых на соседних временных интервалах. При этом вследствие дефицита одномоментных наблюдений интегрирование уравнений состояния выполняется с учетом всех значимых возмущающих факторов. В работе этот вопрос подробно изучен, и необходимые аналитические соотношения приведены к форме удобной для реализации в вычислителе. Алгоритм обработки использует процедуру итеративного алгоритма расширенного фильтра Калмана с UD регуляризацией ковариационной матрицы оценок вектора состояния, что позволяет в итоге обеспечить необходимую точность и устойчивость оценок навигационного вектора.

В пятой главе работы поставлена и решена важная научно-техническая проблема разработки алгоритма высокоточной относительной навигации КА при их групповом полете. Особенность ее постановки состоит в том, что автор нацелен на поиск вычислительно эффективного по затратам алгоритма, обеспечивающего субсантиметровую погрешность относительных координат КА в группе при использовании неоднозначных фазовых измерений, которые выполняются на борту каждого КА в условиях приема сигналов на низких орбитах. При этом наиболее затратной по времени решения является задача формирования надежной оценки вектора, определяющего целое число утраченных периодов при формировании вторичных разностей фаз.

В работе предложен и тщательно проработан двухэтапный алгоритм оценки этого вектора с повышенным (по сравнению с известными аналогами) быстродействием. Первый этап обеспечивает формирование наиболее вероятного значения вектора. При этом полный перебор целого числа периодов не выполняется. На втором этапе выполняется вычисление апостериорной вероятности оценки вычисленного вектора неоднозначности вторичных разностей. В диссертации приведены результаты тестирования разработанного алгоритма, которые получены с использованием опубликованных GPS-измерений, выполненных по программе GRACE. При этом взаимная координатная привязка КА была не хуже 2 – 3 см. Автор разработал методику тестирования разработанного алгоритма и выполнил его верификацию в двух частотном и одночастотном режимах приема сигналов. В последнем случае разнесение КА не превышало 500 м, что неявно свидетельствует о достоверности результатов тестирования алгоритма при одночастотном режиме приема.

Заключительная глава работы Михайлова Н.В. содержит описание БАСН, реализованной в известном специалистам приемнике MosaicGNSS, который производит компания AstriumGmbH и в котором реализованы разработанные в диссертации системотехнические принципы построения бортовой системы и функциональные алгоритмы первичной и вторичной обработки сигналов НКА. В главе представлены



архитектура аппаратной части приемника, структура его программного обеспечения и заявленные производящей компанией технические характеристики BACH. Последний пункт 6 главы содержит результаты летных испытаний BACH MosaicGNSS, опубликованных зарубежными специалистами по итогам летных испытаний бортового оборудования немецкого спутника Terra SAR-X, в состав которого входит эта система космической навигации. Они подтверждают субметровый уровень среднеквадратичных погрешностей (СКП) оценок текущих координат КА в условиях одночастотного приема сигналов на околоземной орбите. При этом СКП определения орбиты по сырым наблюдениям не превышала 70 см.

Научные положения, вынесенные автором на защиту, отражают новые научные результаты, полученные автором диссертации. Их достоверность и обоснованность не вызывают сомнений. Результаты и выводы получены на основе корректного использования теоретических методов математической статистики, статистической радиотехники и математических методов вероятностного моделирования алгоритмов обработки сигналов на ЭВМ с последующим их сопоставлением с данными натурных предполетных и полетных испытаний аппаратуры космического базирования MosaicGNSS.

Замечания, которые можно сделать после изучения работы, состоят в следующем:

- в работе не обсуждаются вопросы чувствительности алгоритмов. В частности, алгоритмов формирования оценок псевдодалности и псевдоскорости к расхождению априорных данных о параметрах моделей (например, интенсивность белого и коррелированного шума в наблюдениях), вводимых в алгоритм обработки, с их фактическими значениями;
- применение метода SoftFlex приводит к энергетическим потерям, которые предложено компенсировать, по тексту работы не совсем ясно: при каких величинах  $C/N_0$  возможна компенсация;
- в 4-й главе нет пояснений физических причин введения в наблюдения коррелированных возмущений и не обсуждаются их статистические свойства. Указано, что корректный учет этих свойств связан с «...разборчивым выбором опорного НС...». Причем, введены они только в наблюдения псевдодалностей. Видимо, это медленная компонента ионосферной составляющей погрешности, не ясно;
- встречаются в тексте и механические опiski, например, в 4-й строке снизу на стр. 131.

В заключительной части отзыва отметим следующие наиболее важные особенности представленной к защите докторской диссертации:

1. Исследования, выполненные автором, посвящены решению важной научно-технической проблемы, которая связана с повышением эффективности использования космических аппаратов различного назначения, на основе применения автономных систем космической навигации.
2. Результаты по существу всех исследований, выполненных в работе, апробированы и представлены заинтересованному научному сообществу в виде опубликованных автором научных статей, докладах на международных конференциях и патентах на изобретения. Они содержатся и в известных специалистам двух монографиях, изданных в 2014 году объемом 8 и 23 усл. печ. листов. Это книги: «Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная



обработка сигналов», соавтор Чистяков В.В. и «Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем».

3. Работу автора отличают широта охвата научно-технических проблем, что характерно для основательных системотехнических исследований по методологии проектирования сложных радиосистем и, в частности, БАСН и, что важно, при этом выдержана необходимая глубина содержательного научного анализа конкретных и принципиальных для реализации системы задач.

4. Исследования автора нашли применение в разработке реальной БАСН, технические характеристики которой подтверждены летными испытаниями бортовой аппаратуры немецкого спутника Terra SAR-X.

Диссертационная работа Михайлова Н.В. «Автономная навигация космических аппаратов с использованием спутниковых радионавигационных систем» в полной мере отвечает критериям, приведенным в «Положении №842 о присуждении ученых степеней», которое утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Диссертация Михайлова Н.В. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, – проблема повышения эффективности эксплуатации искусственных спутников Земли путем применения бортовой аппаратуры спутниковой навигации. Содержание диссертации соответствует специальности 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация» (технические науки), а ее автор, Михайлов Николай Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация».

Официальный оппонент, профессор кафедры «Радиотехнические системы»

ФГБОУ ВПО «Томский университет систем управления и радиоэлектроники» доктор технических наук, профессор

«19» авг. 2016 года

/В.И. Тисленко/

Подпись В.И. Тисленко заверяю  
Секретарь ученого совета ТУСУР

«11» 01 2016 года



С Е.В. Прокопчук

/Е.В. Прокопчук/