

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Кальченко Артема Олеговича

«Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы в полете при помощи информации от спутниковой навигационной системы», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика

Диссертационная работа Кальченко А.О. посвящена разработке методов и алгоритмов калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) в полете при помощи информации от спутниковой навигационной системы (СНС), в том числе выработке режима полета, который позволяет решать поставленную задачу наилучшим образом.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Во введении определяется основная цель работы, приводится содержание работы и обзор основных публикаций.

Первая глава содержит описание систем координат и обозначений. Описываются математические модели инструментальных погрешностей, уравнения ошибок БИНС. Представлены модели корректирующих измерений. Поставлена задача оценки вектора состояния погрешностей БИНС. Задача калибровки БИНС в полете ставится как задача коррекции БИНС при помощи информации от СНС.

Вторая глава посвящена выбору режима полета, обеспечивающего высокую точность калибровки. Показывается, что эта точность обеспечивается путем последовательно соединения двух типов траекторий: высокочастотных колебаний по крену и тангажу с малыми амплитудами с траекторией типа «змейка». Оценка результатов калибровки осуществляется с помощью круговой позиционной ошибки после часа полета в автономном режиме. Выбирается время калибровочного полета, обеспечивающее необходимую точность автономной навигации.

В третьей главе исследуется влияние смещения спутниковой информации и предлагается способ ее учета в модельных уравнениях БИНС. Показано, что включение параметров смещения спутниковой информации в вектор оцениваемых параметров позволяет сохранить требуемую точность навигации.

Четвертая глава посвящена анализу возможности калибровки БИНС в процессе рулежки и разгона летательного аппарата. Путем проведения ковариационного анализа исследованы возможности оценивания составляющих погрешностей БИНС на

соответствующих участках. Показано, что компенсация оценок, полученных на начальном участке, далее при автономной навигации позволяет значительно повысить ее точность.

Пятая глава посвящена анализу результатов использования двух разнесенных антенн СНС. Показано, что привлечение информации от второй антенны СНС не дает значительного улучшения точности автономной навигации для БИНС высокого класса точности.

Шестая глава посвящена результатам эксперимента на стенде, подтверждающим результаты ковариационного анализа.

**Актуальность темы.** С течением времени в процессе работы ИНС параметры ее инструментальных погрешностей изменяются, вследствие чего повышаются ошибки автономной навигации. Наличие во время полета внешней по отношению к инерциальной информации (данные СНС) позволяет проводить оценку инструментальных погрешностей по полетным данным как в режиме постобработки, так и в реальном времени. Таким образом, возникает задача построения методов и алгоритмов калибровки ИНС в полете.

**Научная новизна.** Рассматриваемая задача в настоящее время мало проработана. Поскольку калибровка БИНС в полете направлена на повышение точности БИНС без увеличения ее себестоимости, результаты по этой теме не публикуются в открытой печати по коммерческим соображениям. Диссертационная работа Кальченко А.О. является одной из первых публикаций на данную тему. Особое значение приобретает выбор режима движения, который обеспечивает обусловленность задачи оценивания и который может быть реализован в полете.

**Обоснованность научных положений.** Работа содержит полное и ясно изложенное обоснование всех полученных результатов, сделанных выводов и заключений, с достоверными ссылками на литературу, приведены необходимые для проверки выкладки и доказательства. Все полученные автором алгоритмы испробованы на модельных и экспериментальных данных, продемонстрирована эффективность использованного подхода.

**Практическая значимость** работы не вызывает сомнений. Результаты, полученные в диссертации, могут напрямую использоваться при совместном использовании БИНС и СНС и обеспечить повышение точности автономного режима работы БИНС.

Диссертацию Кальченко А.О. выгодно отличает сочетание хороших научных результатов, корректного применения формальных методов, строгих математических построений с практической и методологической направленностью работы. Положительной особенностью является также то, что все полученные результаты снабжены примерами обработки стендовых данных, подтверждающих справедливость полученных выводов и иллюстрирующих работоспособность приведенных алгоритмов. Необходимо также отметить завершенность, полноту и практическую направленность представленных в диссертации исследований, логичность построения и четкость изложения материала. Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата полностью отражает основные результаты работы.

По теме диссертации соискателем опубликовано четыре работы, в том числе две работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК для представления работ по данному научному направлению.

**Замечания по диссертации.** По работе могут быть высказаны следующие замечания:

1. Работа содержит довольно большое количество опечаток и ошибок, связанных с недостаточно внимательной проработкой текста:

- На стр. 17 написано, что угловая скорость трехгранника  $Ox^0$  — угловая скорость Земли. Это может относиться к трехграннику  $O\eta$ , но не  $Ox^0$ , так как точка  $M$  движется по поверхности Земли, что обеспечивает дополнительную угловую скорость.
- В разделе 1.2 вводятся обозначения для системы  $I$ , ее модификации  $I'$ , но также появляется обозначение  $I''$ , которое не поясняется. Соответственно, теряется смысл утверждения на стр. 24 об эквивалентности  $I'$  и  $I''$ .
- На стр. 29 при описании кинематической угловой ошибки ее производная ошибочно приравнена полной ошибке относительной линейной скорости:  $V'_y - V_y$ .
- На стр. 31, 46, 52 и далее по тексту, а также в автореферате на стр. 12, символ  $\omega$  (омега), применяемый в формулах, в тексте заменяется на символ  $W$  ( $w$ ), что затрудняет понимание.
- в формулах для динамической ошибки скорости на стр. 32 для обозначения компонент угловой скорости Земли используется  $U$  вместо  $u$ .

- В разделе 2.3 погрешности нулевого сигнала ньютонометров заданы в угловых секундах, тогда как согласно определению они имеют размерность линейного ускорения. Та же опечатка присутствует на стр. 11 автореферата.
  - Есть неопределенность с параметром нормировки расстояний и скоростей: где-то берется отношение к параметру  $R$  — без определения (вероятно, радиус сферической Земли), как для частоты Шуллера на стр. 31 или для определения угловой скорости на стр. 38-39, где-то, как для спутниковых измерений на стр. 32, берутся параметры  $R_N, R_E$  — также без определения (радиусы кривизны для соответствующих направлений, обозначения поясняются только на стр. 66), а где-то параметр  $a$  — значение большой полуоси земного эллипсоида.
  - В выражении (3.1) на стр. 64 в правой части должна стоять частная производная от  $\Theta$  по  $X$ , умноженная на производную от  $X$  по времени, а не  $\Theta(dX/dt)$ .
  - На стр. 70 упоминается альтернатива СНС — некая базовая ИНС. Видимо, изначально рассматривался более широкий круг задач.
  - На стр. 73 в формуле для долготы вместо элементов матрицы  $d_{ij}$  стоят элементы не определенной в тексте матрицы  $b_{ij}$ .
2. При анализе калибровочных траекторий хорошо было бы рассмотреть последовательное выполнение эволюций по крену и по тангажу, что, на мой взгляд, гораздо легче реализуемо в полете.
  3. Информация о том, что применение «секундной метки» (PPS, Pulse per Second) не обеспечивает должной синхронизации данных ИНС и СНС, не является обоснованной. Утверждение в п. 3.1 о том, что перемещение информации по каналам связи может внести дополнительное неизвестное запаздывание также сомнительное. Если данные инерциальных датчиков и сигналы PPS получены в одной шкале времени — синхронизация вполне реализуема. Однако, если ИНС разрабатывалась без предположения о дальнейшей коррекции с помощью СНС, синхронизацию может оказаться очень трудно реализовать технически. Поэтому решение задачи оценивания неизвестного смещения во времени спутниковых данных является очень полезным.
  4. Для целостности исследований хорошей добавкой к Главе 5 был бы анализ причин, по которым применение разнесенных антенн СНС не дает улучшения по сравнению с вариантом с одной антенной. Также полезно было бы поместить в диссертации анализ варианта трех разнесенных антенн, дающего полную информацию об ориентации.

**Заключение.** Указанные замечания отнюдь не снижают достоинств диссертационной работы, которая представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему, обладающее научной новизной и практической значимостью. Считаю, что диссертация Кальченко А.О. «Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы в полете при помощи информации от спутниковой навигационной системы» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и соответствует профилю специальности 01.02.01 — «Теоретическая механика», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент



Е.В. Каршаков

Каршаков Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук,  
Старший научный сотрудник Лаборатории №1 «Динамических информационно-управляющих систем» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. +7 495 334 90 80,  
эл. адрес: karshak@mail.ru

31.08.2016

Подпись  
Е.В. Каршаков  
А.А. Каршаков

