УДК 629.7.05

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Волков В.Л., Жидкова Н.В.

Арзамасский политехнический институт филиал Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Арзамас, e-mail: vipvlv@bk.ru

В научном обзоре представлена актуальная информация, полученная в результате изучения и систематизации большого количества первоисточников по тематике компьютерного моделирования бесплатформенных инерциальных систем. Математическая модель бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) использует кинематические уравнения Пуассона, характеризующие угловую ориентацию и уравнения интегрирования, определяющие местоположение подвижного объекта. Для организации алгоритмов инерциальных измерительных систем (IMU) наиболее эффективны кватернионы, использующие параметры Родрига-Гамильтона. В БИНС решена задача компенсации дрейфа показаний гироскопов и случайных шумов других датчиков на основе микро электромеханических систем (МЭМС). Симуляция алгоритмов инерциальных измерительных систем наиболее часто проводится путем компьютерного моделирования в среде *Matlab Simulink*. В качестве результатов моделирования рассматриваются численные результаты по ошибкам оценивания углов ориентации и координат навигации.

Ключевые слова: МЭМС, БИНС, IMU, параметры Родрига-Гамильтона, кватернионы, моделирование, эффективность.

FEATURES SIMULATION OF STRAPDOWN INERTIAL SYSTEMS

Volkov V.L., Zhidkova N.V.

Arzamassky polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev, Arzamas, e-mail: vipvlv@bk.ru

The scientific review provides current information obtained from study and systematization of a large number of primary sources on subject of computer simulation of strapdown inertial systems. Mathematical model of strapdown inertial navigation system (SINS) using Poisson's kinematic equations describing angular orientation and integrating equations that determine location of a moving object. To organize algorithms of inertial measurement unit (IMU) are most effective quaternions using Rodrigues-Hamilton parameters. The SINS solved problem of drift compensation readings gyroscopes and other random noise sensors based on micro-electromechanical systems (MEMS). The simulation algorithm of inertial measurement systems most often done by computer modeling in Matlab Simulink. As results of numerical simulation are considered results of estimation error angles of orientation and navigation coordinates.

Keywords: MEMS, SINS, IMU, the parameters of Rodrigues-Hamilton, quaternions, modeling, efficiency.

Введение

В работе [11] отмечено, что обзорно-аналитические тексты являются весьма эффективным методом решения задач по научной тематике. В данном обзоре представлена актуальная информация, полученная в результате изучения и систематизации большого количества первоисточников по тематике компьютерного моделирования бесплатформенных инерциальных систем. На основе анализа разрозненных сведений произведена оценка состояния научных проблем в данном направлении, а также выявлены тенденции и перспективы их решения.

Следует отметить, что бесплатформенный принцип построения инерциальных измерительных систем нашел свое широкое применение в связи с интенсивным развитием мобильных объектов, таких как беспилотныые летательные аппараты, малогабаритные роботы, гидроциклы, управляемые ракеты. Принципы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и их составных частей – бесплатформенных систем ориентации (БСО) стали особенно актуальны для техники мобильных подвижных объектов. БИНС предназначены для решения навигационных задач подвижных объектов, т.е. определения их пространственного положения относительно выбранной системы координат. Бесплатформенные системы ориентации решают автономные задачи по определению углового положения подвижных объектов. Бесплатформенный принцип исполнения БИНС и БСО стал практически основным при использовании в мобильных подвижных объектах в качестве датчиков первичной информации микро электромеханических систем (МЭМС) и микро ЭВМ.

Математическое представление инерциальных измерительных систем, как правило, реализуется в компьютерные модели с целью дальнейшей проверки работоспособ-

ности алгоритмов и с целью исследования их эффективности. Важнейшее значение при этом имеет применение алгоритмов компенсации нестабильности статических характеристик измерительных приборов и алгоритмов фильтрации случайных погрешностей с целью достижения необходимой точности измерительных систем. Компьютерное исследование алгоритмов инерциальных систем при этом наиболее удачно реализуется на основе инженерного программного обеспечения *Matlab Simulink*.

Обзор бесплатформенных инерциальных измерительных систем

Бесплатформенный принцип организации инерциальных навигационных систем и систем ориентации основывается на интегрировании угловых скоростей и ускорений. В системах ориентации используются три метода: на основе углов Эйлера-Крылова, на основе направляющих косинусов и на основе параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов). Все навигационные методы и методы ориентации, так или иначе, обсуждаются в литературе и имеют право на применение в реальных подвижных объектах для определения их пространственного положения относительно Земли.

В настоящее время для информационного обеспечения подвижных объектов часто используется избыточность измерений. В этом случае применяются датчики первичной информации (ДПИ) частично дублирующие друг друга, использующие различные физические принципы для измерений. При этом погрешности датчиков часто имеют различные причины возникновения и могут быть разделены по частотным диапазонам. При наличии информационной избыточности традиционно применяются алгоритмы комплексной обработки информации. При этом часто удается минимизировать динамические составляющие ошибок при оценивании параметров движения объектов за счет взаимной компенсации ошибок избыточных источников информации.

Следует отметить, что при составлении алгоритмов функционирования инерциальных систем активно используется избыточность информации, получаемая с МЭМС приборов – микрогироскопов, микроакселерометров, магнитометров для компенсации опасной погрешности – дрейфа гироскопов. Основным источником информации инерциального алгоритма ориентации являются проекции относительной угловой скорости, получаемые на основе сигналов трех датчиков угловых скоростей (ДУС) и проекции угловой скорости географического трехгранника, получаемые вычислительным путем. Выходом алгоритма ориентации являются оценки углов тангажа, крена и рыскания: ν, γ, ψ. Дополнительно с целью компенсации погрешностей, используется информация с акселерометров и магнитометров, устанавливаемых по осям связанной системы координат. В алгоритме БИНС, кроме того, используется интегрирование сигналов ускорений относительно земной системы координат, выделенных из показаний акселерометров с целью получения координат объекта – высоты полета и углов широты и долготы местоположения.

Использование МЭМС в инерциальных измерительных системах сдерживается их относительно невысокими точностными характеристиками [24]. Тем не менее, достижения в МЭМС технологии дают для военной, аэрокосмической техники и техники специального назначения датчики инерции уже с достаточно приемлемыми характеристиками. В последние годы точность инерциальных МЭМС датчиков неуклонно повышалась. Нестабильность смещения гироскопов у компании производителя *Silicon Sensing* теперь составляет не более 0,3 °/ч, а акселерометра – 50 мк*g* [2]. Более значительный эффект для инерциальных измерений дает применение инерциальных блоков, т.е. совмещение в одном корпусе 3-осевых датчиков угловых скоростей (ДУС) с акселерометрами, магнитометрами и датчиками температуры. В этом случае путем совместной калибровки их характеристик удается достичь достаточно высокой точности измерения инерциальных параметров. Однако в современных условиях, следует отметить недоступность зарубежных электронных компонентов, к которым относятся и МЭМС, для применения в военной технике и технике специального назначения, что заставляет искать альтернативные – прежде всего алгоритмические пути решения проблем точности инерциальных навигационных систем.

Основные сведения по математике при определении пространственной ориентации и местоположения подвижных объектов представлены в многочисленной отечественной литературе [4-10, 12-23, 25]. Популярными и широкодоступными источниками по данной теме являются [6, 13-23].

В последние годы появилось множество работ в области бесплатформенных инерциальных систем, это связано, в первую очередь с интенсивным развитием летательных аппаратов 4-го и 5-го поколений, беспилотных летательных аппаратов и робототехники. Здесь следует отметить фундаментальные работы Бранца В.Н. и Шмыглевского И.П. [4-6] по принципам построения БИНС. Следует также отметить современные учебные пособия и статьи Матвеева В.В. и Распопова В.Я. [13-16, 19-23], которые эффективно используются, как в учебном процессе, так и в науке и демонстрируют практическое использование математических и компьютерных моделей БИНС и БСО. Пользуются популярностью лекции по БИНС Мелешко В.В. [17].

Ежегодно по тематике бесплатформенных инерциальных систем в России защищается ряд диссертаций, так можно отметить диссертацию Шукалова А. В. на соискание ученой степени к.т.н. по БСО летательных аппаратов на инерциальных датчиках отечественного производства с микросистемными чувствительными элементами, выполненную в Тульском государственном университете [26]. Материал диссертации адаптирован к применению доступных МЭМС, гарантирующих работу БИНС и БСО подвижных объектов специального назначения в условиях замещения импортных МЭМС. Актуальна также диссертация Корнилова А.В. “Методы повышения точности измерений значений параметров полета летательного аппарата резервной системы ориентации”, выполненная в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики в 2014 году [12]. В диссертации основным параметром эффективности БСО рассматривается точность оценивания параметров движения летательного аппарата, что является одним из основных вопросов, исследуемым в ряде статей и учебных пособий известных авторов [1, 16, 18, 19, 23, 24].

Следует отметить большой интерес к разработке математических моделей и исследованию точности инерциальных измерительных систем зарубежных авторов [26-38].

В своем отчете [38] *Woodman O.J.* представил анализ ошибок инерциальной навигации бесплатформенных систем, основанных на *MEMS* устройствах. Для изучения ошибок таких систем он использовал моделирование. В отчете показано, что средняя ошибка в оценивании положения объекта возрастает более чем на 150 м после 60 секунд работы. Причиной такого дрейфа является возникновение ошибок ориентации, вызванных шумом возмущающих сигналов гироскопов. Для примера в отчете показано, что комплексирование гироскопов с магнитометрами дает среднюю ошибку в оценивании положения объекта после 60 секунд уже всего до 5 м. Автор пришел к выводу, что хотя МЭМС технологии БИНС быстро улучшаются, но пока нет возможности построить БИНС, которая бы дала точность определения местоположения всего около одного метра в течение более одной минуты.

В работе [34] *William Premerlani* в соавторстве с *Paul Bizard* предложил осуществлять компенсацию дрейфа показаний ДУСов на основе использования в качестве фильтра ПИ-регулятор (пропорционально-интегрирующий регулятор). Это обосновано тем, что постепенно накапливающиеся ошибки смещения и дрейфа гироскопов проявляются в кватернионах и существенно ухудшают точность оценок. Для определения ошибки отклонения от курса *Premerlani* использует *GPS* измеритель, а акселерометры используются для обнаружения ошибок по крену и тангажу.

Базовые принципы инерциальных навигационных систем рассмотрены в материалах семинара [26].

В работе [27] приведены основные сведения по теории и практике БИНС. Авторы отмечают, что инерциальные блоки измерения (*Inertial Measuring Unit – IMU*) являются основными компонентами инерциальных систем наведения, используемых в воздушном пространстве и гидроциклов, а также в управляемых ракетах.

В статье «Мульти инерциальное измерительное устройство (*MIMU*) на платформе с открытым исходным кодом» [36] авторами рассматриваются принципы функционирования новой системной архитектуры платформы с использованием нового коммуникационного интерфейса.

В работе *Siegwart R*. [35] по инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов (*UAV*) и микро летательных аппаратов (*MAV*) рассматривается проблема разработки алгоритма определения местоположения. Обосновано применение МЭМС датчиков, имеющих недостатки, такие как шум и дрейф. Показана возможность компенсации ошибок с помощью программно-

го обеспечения. Применены датчики низкой стоимости и микропроцессор с ограниченной вычислительной мощностью. Здесь применены кватернионы и фильтры Калмана.

В диссертации [31] рассмотрены модели ошибок гироскопов и акселерометров. Ошибки инерциальной навигации компенсируются на основе фильтра Калмана.

В работе [30] отмечено, что система *FIS*1100 является первым в мире комплексным 6*D* МЭМС. Инерциальный измерительный блок (*IMU*) с комплексным датчиком обеспечивает углы тангажа, крена, и рыскания. При использовании *FIS*1100 в сочетании с прилагаемым *XKF*3 9*D* комплексным датчиком, обеспечивает точность ориентации на уровне ± 3 ° тангажа, крена, и рыскания. *FIS*1100 включает 3-осевой гироскоп и 3-осевой акселерометр, также может быть подключен внешний 3-осевой магнитометр. Цифровой сигнальный процессор (*DSP*) под названием *AttitudeEngine* дает в итоге очень низкую общую мощность системы в сочетании с высокой точностью, которые являются важными для многих портативных объектов с батарейным питанием.

Инерциальная навигационная система *LN*-200*S* [32] с твердотельными волоконно-оптическими гироскопами предназначена для космической техники. Здесь применены также МЭМС акселерометры.

В работе [33] показано, что мульти сенсорная инерциальная навигационная система отличается низкой стоимостью, низкой мощностью потребления энергии, имеет малый вес и небольшой размер. В системе полностью компенсируются ошибки измерения угловых скоростей и линейных ускорений.

В работе [29] приведены данные по точности навигации в военных системах и обычной навигации. Так отмечено, что *IMU Honeywell HG*1700 среднего качества имеет 3 акселерометра с точностью 1 *mg*, 3 кольцевых лазерных гироскопа, точностью 1 град/ч. Частота измерений составляет 100 Гц. Кроме этого, в [29] дано введение в инерциальную навигацию: отмечено основное назначение навигации по оценке положения, ориентации и скорости транспортного средства.

Компьютерное моделирование бесплатформенных инерциальных систем

Вопросам компьютерного моделирования инерциальных систем посвящено довольно мало работ. Отдельные вопросы моделирования БИНС и БСО рассматривались в работах [3, 7-8, 10, 13]. В работе [13] показаны примеры моделирования БСО с помощью программного обеспечения *Matlab Simulink* без применения алгоритмов компенсации нестабильности статических характеристик измерительных приборов. В работе [3] продемонстрировано также, как и в работе [13], моделирование с помощью *Matlab Simulink* измерительной системы БСО, основанной на углах Эйлера-Крылова без раскрытия каких-либо подробностей построения системы моделирования. Следует отметить, что реализация алгоритмов БСО на основе углов Эйлера-Крылова или направляющих косинусов предполагает решение нелинейных кинематических уравнений при наличии критических точек – так называемых шарнирных замков (*Gimbal Lock*), что ограничивает их применение в быстродействующих БСО. Большинство авторов БИНС и БСО отдают предпочтение алгоритмам на базе математических моделей с параметрами Родрига-Гамильтона. Кинематические уравнения, составленные в параметрах Родрига-Гамильтона линейны и интегрируемы при любых углах Эйлера-Крылова. В работах [7, 10] представлены математические модели и описано программное обеспечение *Matlab* для задачи моделирования БСО, основанной на кватернионах, и представлены результаты моделирования БСО.

В следующей статье по тематике моделирования БИНС [8], в продолжение научных исследований [7, 10], представлен материал по математическому моделированию и симуляции БИНС, использующей математику кватернионов. Реализация алгоритма БИНС является на порядок сложнее по сравнению с алгоритмом БСО, т.к. в этом случае, во-первых, алгоритм БСО уже является составной частью алгоритма БИНС, во-вторых, приходится создавать и использовать динамическую модель движения объекта по отношению к Земле. В статье [8] описано моделирование БИНС в инструментальной среде *Simulink* с целью проверки математических моделей и получения результатов исследования эффективности БИНС при их работе в различных динамических режимах. Исполнение математических моделей БИНС в *Simulink* позволило получить понятную визуальную модель системы и реализовать многочисленные операции дифференцирования и интегрирова-

ния более гибко на стандартных элементах. Практическая направленность статьи позволяет повторить предлагаемые модели и схемы, получить результаты симуляции и оценить эффективность алгоритмов БИНС.

В статье [37], опубликованной в 2015 г. в материалах журнала *International Journal Of Applied And Fundamental Research*, предпринималась попытка краткого обзора результатов компьютерного эксперимента по симуляции алгоритмов функционирования БСО и БИНС, использующих МЭМС гироскопы, акселерометры и магнитометры при реализации кинематических уравнений Пуассона с помощью кватернионов. Обсуждались результаты по значениям среднего квадрата ошибки (СКО) и предельной ошибки для навигационных параметров и углов ориентации при наличии значительного дрейфа гироскопов. Было показано, что применение предложенной методики компенсации дрейфа гироскопов в алгоритмах с помощью ПИ-регулятора дает приемлемые для практики ошибки. Ограниченный объем статьи [37] не позволил рассмотреть информацию по теме в полном объеме, не позволил систематизировать первоисточники и сделать анализ и практические выводы.

Далее здесь представлены некоторые выдержки из наиболее актуальной статьи по моделированию *IMU* (*Inertial Measiring Unit*) [8] для более полного понимания особенностей моделирования бесплатформенных инерциальных систем и доказательства эффективности сформированного алгоритма БИНС.

На рисунке 1 в виде структурной схемы представлен навигационный алгоритм БИНС, основанный на кинематических уравнениях [8].

В схеме использован конвертор вектора кажущегося ускорения с акселерометров для пересчета в земную систему координат. Этот конвертор работает на основе кватернионного умножения $L*N*L$, где L, N – кватернионы соответственно углов Эйлера и ускорений. На вход конвертора поступает вектор ускорений в связанной системе координат (непосредственно с акселерометров, привязанным к трем осям) $N = [n_X, n_Y, n_Z]$, на выходе получается вектор ускорений в земной системе координат $Ng = [n_{Xg}, n_{Yg}, n_{Zg}]$, необходимый для работы БИНС.

Математическая модель БСО, хотя и не включена в схему БИНС, является составной частью алгоритма БИНС, т.к. определение угловой ориентации подвижного объекта необходимо для решения задачи навигации.

Схема моделирования БИНС представлена на рис. 2.

Схема содержит следующие блоки.

1. Блок имитации параметров движения объекта, который осуществляет имитацию углового движения объекта с учетом изменения углов υ, γ, ψ по синусоидальным законам и с учетом движения объекта вдоль Земли с линейной скоростью. Также этот блок осуществляет имитацию абсолютного ускорения объекта с учетом эволюции ускорений по осям географической системы координат по синусоидальным законам;

2. Блок основных датчиков (ДУС и акселерометры), выдает три составляющих абсолютной угловой скорости (ω_{XS}, ω_{YS}, ω_{ZS}) и три компоненты кажущегося ускорения в связанной системе координат (n_X, n_Y, n_Z);

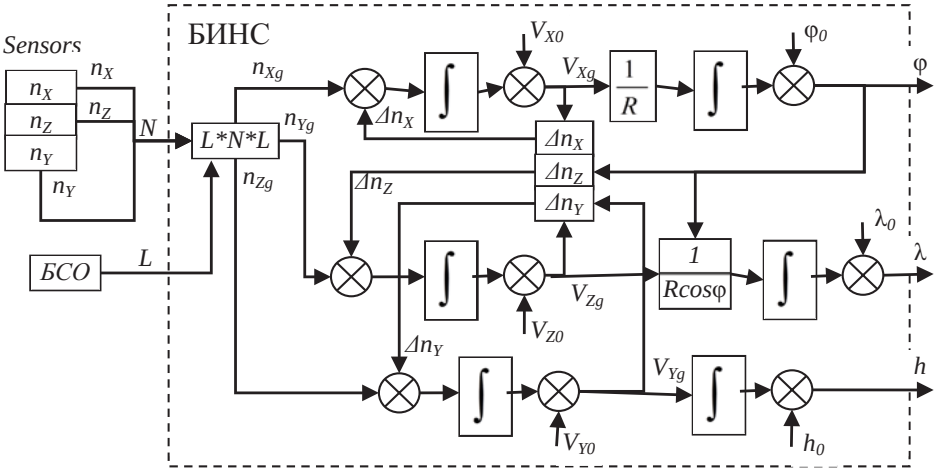

Рис. 1. Структурная схема алгоритма БИНС

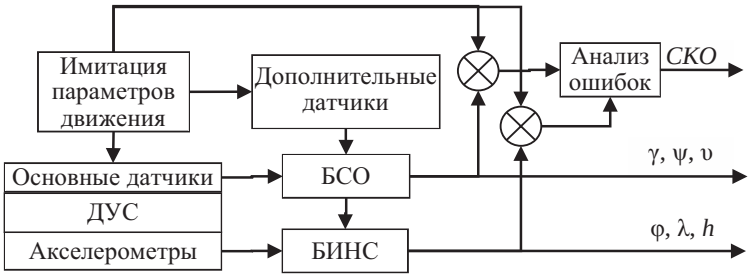

Рис. 2. Схема моделирования БСО и БИНС (γ, ψ, υ – оценки углов; φ, λ, h – оценки координат)

3. Блок дополнительных датчиков, вычисляет данные об угловом движении объекта на основе избыточной информации (в данном случае с акселерометров и магнитометров);

4. Блок БСО, осуществляет решение кинематических уравнений углового движения объекта на основе информации, получаемой с ДУС и с дополнительных датчиков;

5. Блок БИНС осуществляет интегрирование скомпенсированных сигналов акселерометров и выдает координаты объекта в виде параметров φ, λ, *h*;

6. Разностные элементы, вычисляют ошибки оценивания углов Эйлера и координат φ, λ, *h*;

7. Блок анализа ошибок, вычисляет средние квадраты ошибок оценивания углов ориентации и координат объекта и их предельные значения. Кроме того, блок анализа позволяет получить графики оценок углов и координат объекта на фоне их истинных значений для визуального анализа точности.

Для исследования работоспособности алгоритма БИНС в комплексе с БСО необходимо придерживаться схемы моделирования, разработанной для среды *Matlab Simukink* [8]. Такая схема представлена на рис. 3.

На схеме рис. 3 в качестве основных датчиков представлены ДУС и акселерометры, играющие основную роль в работе БИНС. В качестве дополнительных датчиков используются магнитометры и акселерометры (для алгоритма БСО).

На схеме рис. 1 была показана связь алгоритма БСО с алгоритмом БИНС. Эта связь необходима при реализации алгоритма БИНС на основе кватернионов. В этом случае легко выполняется пересчет показаний акселерометров в земную систему координат.

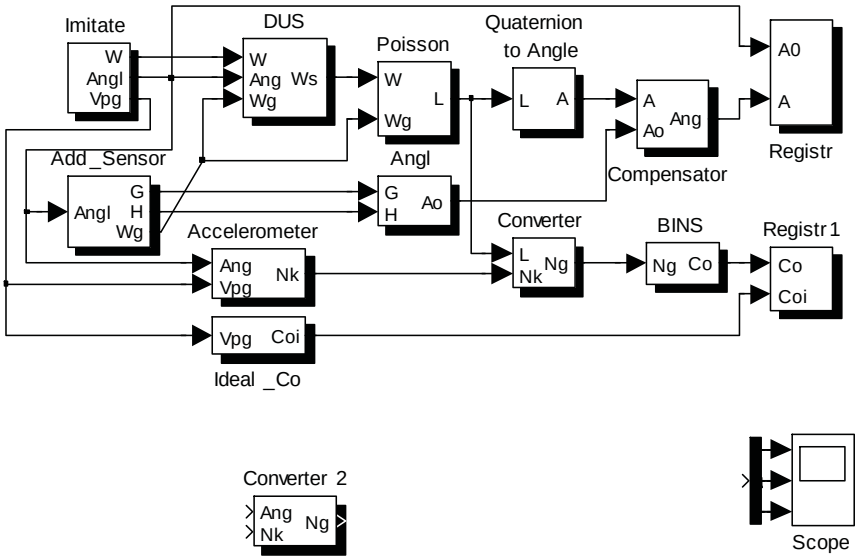

Рис. 3. Структурная схема моделирования БИНС и БСО

На схеме имеется блок имитации исходных данных для задания углов ψ, υ, γ и параметров ускорения объекта в земной системе координат (в данном случае по синусоидальным законам в разрешенных пределах). Задание других многочисленных параметров для функционирования БСО и БИНС осуществляется с помощью управляющей программы.

На схеме использованы блоки: *Imitate*, *DUS*, *Add_Sensor*, *Poisson*, *Quaternion to Angle*, *Angi*, *Compensator*, *Registr*, *Accelerometer*, *Ideal_Co*, *Converter*, *BINS*, предназначенные для реализации алгоритма БИНС и его моделирования. В блоке *Imitate* заложена схема моделирования ускорений объекта в земной системе координат. На схеме использованы синусоидальные датчики, выдающие параметры ускорений *Vpx*, *Vpy*, *Vpz*, которые настроены на конкретные амплитуды, начальные значения и частоты.

Моделирование алгоритма БИНС в работе [8] проведено с помощью программной среды *Matlab Simulink*. В качестве результатов моделирования приведены графики основных процессов и численные результаты по ошибкам оценивания углов ориентации. Результаты компьютерного эксперимента подтвердили эффективность алгоритма БИНС в системах определения пространственного положения маневренных подвижных объектов в широком диапазоне сигналов и шумов. В итоге, компенсация дрейфа гироскопов, применяемая в алгоритме оценивания на основе кватернионов дает высокую точность оценок (не хуже 0,000005%), что доказывает эффективность компенсации ошибок дрейфа гироскопов.

Выводы

Авторы данной работы проводили исследования на основе многочисленных источников информации, некоторые из которых отражены в списке литературы, и на основе собственных разработок.

Была показана эффективность и практическая ценность современных алгоритмов БСО и БИНС, основанных на использовании параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов).

Компьютерное исследование БСО и БИНС большей частью реализуется в инженерной среде *Simulink Matlab*, что дает визуальную наглядность схем, возможность их повторения и модификации математических моделей.

В качестве основных результатов математического и компьютерного моделирования в алгоритмах БСО и БИНС рассматриваются средние квадраты ошибок (СКО) и их предельные значения.

Отмечено, что для достижения приемлемых значений СКО необходимо использовать схемы компенсации дрейфа гироскопов и фильтрации шумовых составляющих датчиков. С этой целью особенно эффективным оказывается применение компенсационных схем с ПИ-регулятором и использованием фильтра Калмана.

Список литературы

1. Алешкин В.В. Оценка влияния погрешностей датчиков на точность комплексной системы ориентации и навигации на грубых инерциальных датчиках / В.В. Алешкин, П.Н. Голованов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 50. – С. 58-65.

2. Бакмачев А. МЭМС-гироскопы и акселерометры Silicon Sensing: английские традиции, японские технологии // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 18-26.

3. Белочкин П.Е. Особенности моделирования бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера в среде Matlab и Mathcad / П.Е. Белочкин, Д.А. Кацай // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5. – С. 18-20.

4. Бранец В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.

5. Бранец В.Н. Введение в теорию БИНС. – М.: Наука, 1992. – 280 с.

6. Бранец В.Н. Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем управления: учебное пособие. – М., 2009. – 338 с.

7. Волков В.Л. Обработка информации в системе ориентации на основе МЭМС / В.Л. Волков, Н.В. Жидкова: Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2015. – № 110. – С. 279-286.

8. Волков В.Л. Моделирование бесплатформенной навигационной системы / В.Л. Волков, Н.В. Жидкова // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №7. – URL: http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article &article_id=10003663.

9. Голубев Ю.Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2013. – № 39. – URL: http//library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-39.

10. Жидкова Н.В. Моделирование бесплатформенной системы ориентации / Н.В. Жидкова, В.Л. Волков // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: http://www.science-education.ru/121-17099.

11. Курзанов А.Н. Научный обзор: роль и место в системе информационно-аналитических текстов, подготовка в формате журнальной статьи. – URL: http://science-review.ru/Articles1.html.

12. Корнилов А.В. Методы повышения точности измерений значений параметров полета летательного аппарата резервной системы ориентации: дис. … канд. тех. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014. – 143 с.

13. Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев,

В.Я. Распопов / под ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.

14. Матвеев В.В. Бесплатформенная система ориентации с акселерометрической коррекцией // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 12-15.

15. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы: учебное пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 199 с.

16. Матвеев В.В. Алгоритм ориентации для вращающегося по крену летательного аппарата / В.В. Матвеев, А.П. Шведов, С.И. Серегин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 9 (138). – С. 5-9.

17. Мелешко В.В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учеб. пособие / В.В. Мелешко, О.И. Нестеренко. – Кировоград: Полимед Сервис, 2011. – 171 с.

18. Погорелов М.Г. Анализ точностных характеристик магнитометрической системы ориентации / М.Г. Погорелов, А.П. Шведов, Д.М. Малютин // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 21-24.

19. Распопов В.Я. Микросистемная авионика: учебное пособие. – Тула: Изд-во «Гриф и К», 2010. – 248 с.

20. Распопов В.Я. Бесплатформенные системы ориентации и навигации на микромеханических чувствительных элементах / В.Я. Распопов, В.В. Матвеев. – Тула: ГОУ ВПО «Тульский государственный университет», 2008. – 221 с.

21. Распопов В.Я. Микросистемы угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 3-12.

22. Распопов В.Я. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В.Я. Распопова. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.

23. Распопов В.Я. Метод коррекции бесплатформенной системы ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата / В.Я. Распопов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 9 (138). – С. 10-14.

24. Сысоева С.С. Тенденции рынка Higt-end МЭМС датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 41-46.

25. Шукалов А.В. Информационно-измерительная бесплатформенная система ориентации летательных аппаратов на инерциальных датчиках отечественного производства с микросистемными чувствительными элементами: дис. … канд. тех. наук. – Тула: ТГУ, 2014. – 165 с.

26. Basic Principles of Inertial Navigation. Seminar on inertial navigation systems ampere University of Technology. – URL: http://aerostudents.com/files/avionics/ InertialNavigation Systems.pdf, 2014. – 22 p.

27. Hazry D. Study of Inertial Measurement Unit Sensor / D. Hazry, M. Sofian, A. Azfar. Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems (ICoMMS), 2009. Batu Ferringhi, Penang, MALAYSIA.

28. Osquldas vag 10, 2015. – URL: http://www.openshoe.org/wp-content/uploads/2014/02/mimu_platform.pdf

29. Introduction to Inertial Navigatio / FFI forsvarets, forskningsinstitutt. URL: http://www.navlab.net/Publications/Introduction_to_Inertial_Navigation.pdf, 2015. – 20 p.

30. FIS1100 – 6D inertial measurement unit with motion co-processor end sensor fusion library. / Fairshild Semiconductor corporation. FIS1100, rev. 1.0. – URL: https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FI/FIS1100.pdf, 2015. – 51 p.

31. Flenniken I.V. Modeling inertial measurement units and analyzing the effect of their errors in navigation applications. – Auburn, Alabama, 2005. – 151 p. – URL: http://gavlab.auburn.edu/uploads/Flenniken_thesis.pdf

32. LN-200S Inercial mesurement mnit (IMU). – California, USA: Northrop grumman systems corporation, 2013. – URL: http://www.northropgrumman.com/ Capabilities/LN200s nertial/ Documents/ln200s.pdf

33. Multisensor Inertial Measurement Unit. / UTC Aerospace Systems. Sensors & Integrated systems. – Connecticut, USA. – URL: www.utcaerospacesystems.com

34. Premerlani W. Direction Cosine Matrix IMU: Theory / W. Premerlani, P. Bizard. – URL: http://gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf, 2009. – 30 p.

35. Siegwart R. Development of a planar low cost Inertial Measurement Unit for UAVs and MAVs. – Zurich: Swiss federal institute of technology – Autonomous Systems Lab, 2008. – 94 p. – URL: http://www.sky-sailor.ethz.ch/docs/ Development_of_a_Planar_Low_Cost_Inertial_Measurement_Unit_for_UAVs_and_MAVs_(Fux2008).pdf

36. Skog I. An Open-source Multi Inertial Measurement Unit (MIMU) Platform / I. Skog, J-O. Nilsson, P. Handel. – Stockholm, Sweden: Department of Signal Processing, ACCESS Linnaeus Centre KTH Royal Institute of Technology.

37. Volkov V.L. Mathematical modeling of inertial measurement systems // International Journal Of Applied And Fundamental Research. – 2015. – № 2. – URL: www.science-sd.com/461-24795

38. Woodman O.J. An introduction to inertial navigation. Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet. – URL: http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/ ISSN 1476-2986, 2007. – 37 p.