

Анализ разработок современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем

05, май 2017

Борисова А. Ю., Смаль А. В.

УДК: 629.052.7

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

kafsm7@sm.bmstu.ru

Введение

За последнее десятилетие в области навигационного оборудования активно ведутся разработки инерциальных навигационных систем (ИНС). В этой области важным достижением можно считать появление бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Можно сказать, что на сегодняшний день осуществлен полный переход от платформенных инерциальных навигационных систем к бесплатформенным, так как они имеют ряд существенных преимуществ, таких как:

- высокая информативность и универсальность;
- высокая точность формирования выходной информации;
- высокая скорость выдачи информации;
- высокая надежность;
- высокая устойчивость к вибрационным и ударным воздействиям;
- меньшие масса-габаритные параметры;
- меньшее энергопотребление.

БИНС являются универсальным источником, предоставляющим полную навигационную информацию об углах курса, тангажа, крена, ускорения, скорости движения и координатах объекта [1].

1. Классификация бесплатформенных инерциальных навигационных систем

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы имеют широкую область применения как в гражданской, так и в военной технике. БИНС применяются, как для наземной техники, так и для морской, и воздушной. Наибольшее распространение БИНС получили для авиационных навигационных систем.

Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы подразделяются по уровню точности. Существуют системы низкой, средней и высокой точности.

Системы низкой точности предназначены в основном для стабилизации оборудования, к примеру, оптических и антенных систем или для обеспечения устойчивости управ-

ляемых объектов. Точность определения координат таких систем колеблется в диапазоне от 5,5 км/ч до 37 км/ч. В качестве чувствительных элементов в системах с низкой точностью в основном применяются микромеханические гироскопы (ММГ) и микромеханические акселерометры (ММА).

Системы средней и высокой точности предназначены для решения задач автономной навигации. Точность определения координат в случае систем средней точности находится в интервале от 1,85 км/ч до 5,5 км/ч, а для систем высокой точности от 0,4 км/ч до 1,85 км/ч. Системы с высокой точностью прежде всего применяются в аппаратах специального назначения.

Высокая и средняя точность системы обеспечивается за счет таких датчиков, как ЛГ и ВОГ. В качестве акселерометров в таких системах используются компенсационные акселерометры маятникового типа. Так же существуют достаточно точные зарубежные МЕМС датчики, но данные типы датчиков существенно дороже имеющихся на рынке датчиков широкого потребления [2].

Наблюдается большой прогресс в совершенствовании и создании новых датчиков инерциальной информации. В области гироскопических датчиков усовершенствованы, прежде всего, лазерные гироскопы (ЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), так же активно развиваются микромеханические гироскопы (ММГ).

К недостаткам ММГ можно отнести их относительно невысокую точность 100 - 1000 град/час и недостаточную стабильность масштабного коэффициента, в следствии чего данные гироскопы используются в системах низкой и средней точности. В системах высокой точности применяются ВОГ и ЛГ. Данные гироскопы не содержат сложных механических деталей, обеспечивают высокую точность измерения. Общепринятой нормой является ошибка счисления координат БИНС равная 1,85 км/ч. Использование в системе ВОГ и ЛГ позволяет достичь этот уровень, так как инструментальный дрейф этих гироскопов не превышает $0,01^\circ/\text{ч}$ [3].

В системах, в которых требуется обеспечивать высокую точность при работе в широком диапазоне ускорений применяются компенсационные акселерометры. Компенсационные акселерометры делятся на акселерометры с позиционной обратной связью (АК с «электрической пружиной»), со скоростной обратной связью (интегрирующие АК) и с обратной связью по ускорению (АК с двойным интегрированием). Наибольшее распространение получили компенсационные акселерометры с маятниками из кварца или кремния, так как характеристики этих АК близки к требованиям, предъявляемым к АК для БИНС [4]:

- масштабный коэффициент должен быть меньше $9 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. ;
- смещение нуля должно быть меньше $8 \cdot 10^{-5} g$;
- изменение углов ориентации базовой плоскости должно быть в пределе $\pm 40^\circ$;
- низкая чувствительность выходного сигнала к изменению температуры.

БИНС подразделяются на три типа: автономные (инерциальные) системы (ИНС), системы со спутниковой навигацией (СНС) и интегрированные инерциально-спутниковые системы.

Основным достоинством ИНС считается их полная автономность и помехозащищенность, но они не лишены недостатков, главным из которых является накопление ошибки со временем. Данный недостаток ведет к снижению точности системы. Для решения этой проблемы разрабатываются алгоритмы, компенсирующие погрешности чувствительных

элементов [5]. Алгоритмы компенсации погрешностей повышают точность определения навигационной информации, но возможно это только после того, как будет изучен обширный массив показаний гироскопов и акселерометров в результате их испытаний [6]. Данное решение проблемы является не оптимальным, в связи с тем, что каждый алгоритм индивидуален для определенного типа датчика. При написании алгоритмов необходимо учитывать все внешние факторы, повлиявшие на появление тех или иных погрешностей с учетом погрешностей оборудования, используемого в процессе калибровки, в случае отсутствия методов надежного детектирования моделей ошибок алгоритмы могут не только не увеличить точность навигационной системы в процессе эксплуатации, но и наоборот уменьшить [7]. Так же данные алгоритмы обладают высокой вычислительной сложностью.

Более простым решением является применение в системах спутниковых навигационных систем (СНС). Использование СНС позволяет повысить точность определения местоположения за счет непрерывно поступающего сигнала со спутников ГЛОНАСС/GPS. В любой момент времени объект способен за минимальное время определить параметры своего движения. Этот факт является безусловным достоинством использования СНС, но опыт показал, что спутниковые навигационные системы имеют так же слабые стороны. При потере сигнала со спутника в сложных географических условиях или при его подавлении система становится неработоспособной, в связи с отсутствием в системе информация об ориентации объекта.

С учетом достоинств ИНС и СНС, в настоящее время наибольшее распространение получило их совместное использование. Системы, включающие в себя как ИНС, так и СНС получили название интегрированные системы. В таких системах ИНС работает в режиме коррекции от СНС, то есть показания, полученные с ИНС корректируются сигналами со спутников. Применение данной интегрированной системы позволяет снизить показание ошибки, тем самым повышается точность системы, при этом при потере сигнала от спутника система может какое-то время продолжать работу в автономном режиме.

Для наглядности достоинства и недостатки ИНС, СНС и интегрированной системы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Достоинства и недостатки инерциальной, спутниковой и интегрированной навигационной системы

Вид системы	Достоинства	Недостатки
ИНС	Полная автономность. Помехоустойчивость. Наличие информации об ориентации.	Наращение ошибок со временем. Необходимость ввода начального положения.
СНС	Высокая точность. Нет роста ошибок со временем.	Отсутствие информации об ориентации, а, следовательно, невозможность работы в автономном режиме. Подверженность внешним помехам.
Интегрированная система	Возможность работы автономном режиме. Наличие информации об ориентации. Высокая точность.	При потере сигнала со спутника, возможен рост ошибок. Кратковременная работа в автономном режиме.

2. Состав бесплатформенных инерциальных навигационных систем

БИНС обеспечивают непрерывную выработку информации о курсе, координатах, скорости движения и параметрах угловой ориентации объекта, на котором установлен БИНС. На рис. 1 представлена структурная схема бесплатформенной инерциальной навигационной системы. БИНС в качестве измерителей используют инерциальные чувствительные элементы: акселерометры и гироскопы, имеющие по три оси чувствительности, жестко связанные с корпусом объекта. Ускорения объекта определяются на базе полученной информации с акселерометров, а значения скоростей объекта вычисляются на основе полученной информации с гироскопов. Акселерометры и гироскопы входят в состав так называемого блока чувствительных элементов (БЧЭ).

В качестве гироскопов, используемых в качестве инерциальных чувствительных элементов БИНС применяют механические, оптические и микромеханические гироскопы.

Задачи ориентации (определение углового положения объекта) и навигации (определение местоположения объекта) решаются в вычислителе (В), который обрабатывает информацию, поступающую с блока чувствительных элементов, а именно информацию о векторе кажущегося ускорения $\overline{a_{xyz}}$ в проекциях на оси связанной с объектом системы координат xyz , а также о векторе угловой скорости $\overline{\dot{\theta}_{xyz}}$ в проекциях на оси той же системы координат [8]. Вычислитель производит преобразование проекций ускорения и скоростей из связанной системы в навигационную, то есть вычисляются значения угла курса, тангажа и крена. Так же в вычислителе осуществляется фильтрация полученной информации и алгоритмическая компенсация погрешностей акселерометров и гироскопов. Аналоговые сигналы с БЧЭ, пропорциональные ускорениям и скоростям поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Далее полученные цифровые сигналы поступают на вход вычислителя.

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы могут формировать и выдавать навигационную информацию, как в автономном (инерциальном) режиме, так и в режиме интеграции со спутниковой навигационной системой (СНС).

Со спутниковой навигационной системы в вычислитель поступает корректирующая информация о координатах и скоростях объекта. При наличии информации от СНС вычислитель корректирует навигационные параметры, в случае же ее отсутствия, на выходе вычислителя будет инерциальная информация.

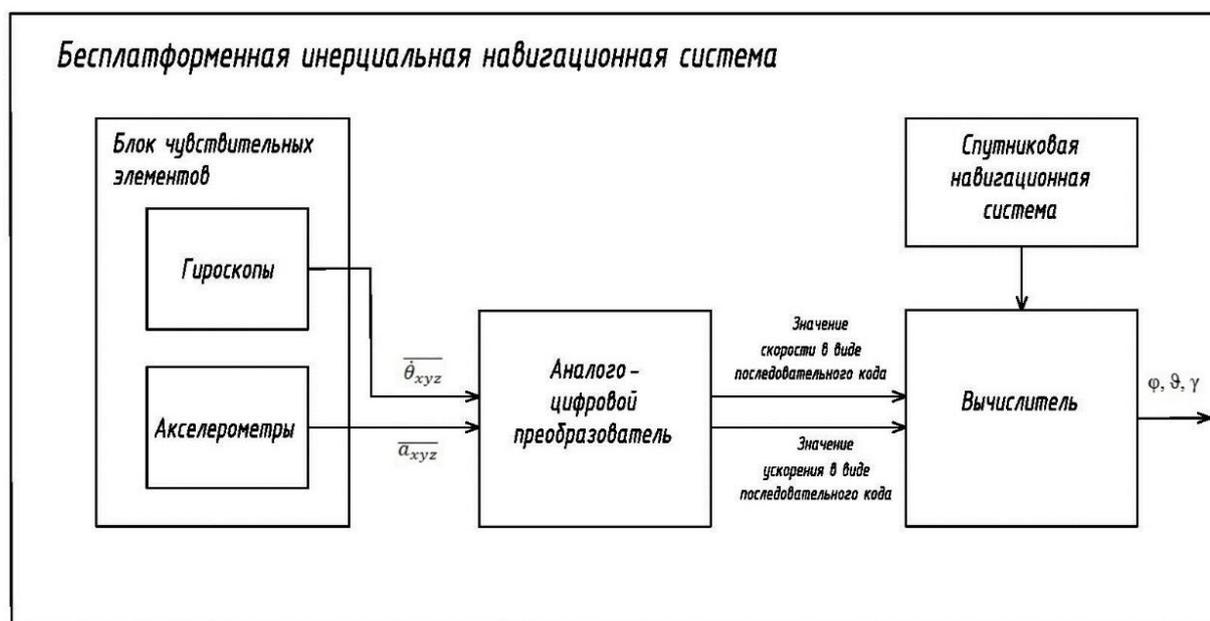


Рис. 1. Структурная схема БИНС

3. Отечественные и зарубежные разработки в области бесплатформенных инерциальных навигационных систем

Создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем является одним из приоритетных направлений отечественного и зарубежного приборостроения. Как было написано ранее к БИНС предъявляются высокие требования по точности, доступности и непрерывности функционирования для различных моментов работы. Обеспечить выполнение этих требований на сегодняшний день возможно при использовании интегрированных систем. В связи с этим ведутся разработки систем, работающих в режиме коррекции ИНС от СНС. В данных системах ИНС и приемник сигналов со спутника представлены в рамках единой, конструктивно обособленной единицы.

Московский институт электромеханики и автоматики выпускает бесплатформенные инерциальные системы двух классов точности БИНС-СП-1 и БИНС-СП-2 для авиационного применения. Данные системы используются в самолетах Як-130, Ту-160, Ан-70, Су-35 и др. Обе системы конструктивно выполнены по классической схеме, и оснащены встроенным спутниковым приемником. Различие систем в том, что в БИНС-СП-2 установлен более высокопроизводительный вычислительный блок [9].

Предприятие ООО «Гиролаб» разрабатывает бесплатформенные инерциальные навигационные системы трех классов точности. Системы средней точности GL-SVG-03 и повышенной точности GL-90 (название до 2015 года "БИНС-500"), GL-100 (название до 2015 года — "БИНС-501"), GL-150 предназначены в основном для решения задачи автономной навигации. Системы низкой точности GL-SVG-02 предназначена для стабилизации оборудования. Область применения разрабатываемых БИНС широка, они применяются, как для наземной техники, так и для морской, и воздушной.

Отечественные предприятия так же разрабатывают малогабаритные БИНС. Среди таких систем можно выделить бесплатформенную инерциальную навигационную систему Компа-Нав-3, разработанную ООО «ТЕКНОЛ». Система представляет собой комбинацию блока микроэлектромеханических инерциальных датчиков и приёмника спутниковой навигационной системы, размещённых в общем корпусе [10].

В таблице 2 приведены основные характеристики отечественных бесплатформенных инерциальных навигационных систем, предполагающих режим спутниковой коррекции.

Таблица 2. Основные характеристики отечественных БИНС

Система \ Характеристики	БИНС-СП-1	БИНС-СП-2	Компа-Нав-3	GL-SVG-02	GL-SVG-03	GL-90	GL-100	GL-150
	Параметры инерциальной системы							
Точность (σ) определения координат, км/ч	3,7	1,85	5,5	5,5-37	1,85-5,5	0,4-1,85		
Точность (σ) определения угла крена, тангажа, °	0,05	0,025	0,4	0,4	0,2	0,06	0,05	0,04
Точность (σ) определения угла курса, °	0,1	0,025	-	-	-	0,2	0,12	0,08
Тип гироскопа	БЛГ-1	БЛГ-1	MEMS	ВОГ/ MEM S	ВОГ/ MEM S	ВОГ/ MEMS		
Тип акселерометра	АК-15	АК-15	MEMS	MEM S	MEM S	MEMS		
Коррекция БИНС по данным приёмника СНС	+	+	+	+	+	+		
	Внешние воздействующие факторы и условия применения							
Угловые скорости, °/с	±400	±400	±250	±300	±220	±400	±250	±100
Линейные ускорения, g	±12g	±12g	±5g	±5g	±5g	±30g		

Среди зарубежных производителей, выпускающих бесплатформенные инерциальные навигационные системы можно выделить компанию «Lition», на сегодняшний день их разработки продолжает американская военно-промышленная компания «Northrop Grumman». Данный производитель выпускает БИНС двух классов точности на базе кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ), волоконно-оптических гироскопов и MEMS акселерометров. Другой американской компанией занимающейся разработкой бесплатформенных инерциальных навигационных систем является компания «Honeywell». Среди европейских производителей можно выделить французскую компанию «Safran» выпускающую БИНС высокой точности. В качестве чувствительных элементов в данных системах ис-

пользуются КЛГ и компенсационные акселерометры с маятниками из кварца. В таблице 3 приведены характеристики зарубежных БИНС.

Таблица 3. Характеристики зарубежных БИНС

Система	LN120G	LN251	Sigma95N	HG2170
Характеристики	«Northrop Grumman»		«Safran»	«Honeywell»
	Параметры инерциальной системы			
Точность (σ) определения координат, км/ч	0,9	1,5; 1,85; 3,7	0,9	3,7
Точность (σ) определения угла крена, тангажа, °	0,02	0,01	0,03	0,01
Точность (σ) определения угла курса, °	0,026	0,02	0,05	0,05
Тип гироскопа	КЛГ	ВОГ	КЛГ	КЛГ
Тип акселерометра	MEMS	MEMS	маятниковый	кварцевый
Коррекция БИНС по данным приемника СНС	+	+	+	+

Заключение

В данной статье был проведен анализ состояния разработок бесплатформенных инерциальных навигационных систем трех классов точности. При анализе рассмотренных БИНС было выявлено, что точность системы зависит, как от типа самой системы, так и от типа гироскопов и акселерометров, входящих в состав блока чувствительных элементов. Был сделан вывод, что повышение точности БИНС идет по двум основным направлениям: повышение точности за счет совершенствования гироскопов и акселерометров и поиска новых конструктивных и алгоритмических решений при построении БИНС.

Список литературы

- [1]. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Скрипников С.Ф., Хмелевская М.И., Буравлев А.С., Кострицкий С.М., Фелоров И.В., Зуев А.И., Варнаков В.К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконнооптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2014. №1. С. 14-25.
- [2]. Коновалов С.Ф., Пономарев Ю.А., Майоров Д.В., Подчерзцев В.П., Сидоров А.Г. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №10. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/219257.html> (дата обращения: 18.12.2016).

- [3]. Woodman O.J. An interoduction to inertial navigation // University of Cambridge Laboratory. 2007. №696. Режим доступа: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/> (дата обращения 27.01.2017).
- [4]. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В. Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока // Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. Том 2. М.: Изд-во НИУ ВШЭ. 2013. С.372-378.
- [5]. Фомичев А.В., Тань Л. Разработка алгоритма быстрой компенсации погрешностей комплексированной инерциально-спутниковой системы навигации малогабаритных летательных аппаратов в условиях сложной среды. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. №10. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/821641.html> (дата обращения 03.02.2017).
- [6]. Терешков В.М. Полунатурное моделирование датчиков инерциально-спутниковых навигационных систем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2010. №8. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/152269.html> (дата обращения 27.02.2017).
- [7]. Пазычев Д.Б. Балансировка бесплатформенной инерциальной навигационной системы среднего класса точности // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №3. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/168994.html> (дата обращения 06.04.2017).
- [8]. Bezick S.M., Pue A.J., Patzelt C.M. Internal Navigation for Guided Missile Systems // Johns Hopkins APL technical digest. 2010.
- [9]. Кузнецов А.Г., Портнов Б.И., Измайлов Е.А. Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы двух классов точности. // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2014. № 8. С. 24-32.
- [10]. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю.А., Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32-41.