

ТРИДЦАТИЛЕТНИЙ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ИМЕНИ М.И. ЗАХАРИНА

А.А. Леонец, И.С. Богацкий, В.А. Романовский, С.С. Лысенко
Межотраслевой научно-исследовательский институт проблем механики «Ритм»
при НТУУ «КПИ», Киев, Украина

На Украине работы в области бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) одним из первых в 50-е годов прошлого столетия были начаты профессором Михаилом Ивановичем Захариным (1920 – 2002). В опубликованных им монографиях [1, 2], авторских свидетельствах и докторской диссертации одним из первых ученых Советского Союза была предложена и научно обоснована идея создания принципиально нового типа бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), в которых в отличие от платформенных систем базовая система координат и текущее значение вертикали моделируется математически в бортовом вычислителе [3, 4].

В период 1965-1968 гг. в рамках темы «Союз» под руководством Захарина М.И. на базе КВИАУ совместно с Институтом кибернетики АН Украины впервые было проведено макетирование БИНС на поплавковых гироскопах типа Л-7, а также экспериментальное исследование макета на специально оборудованной машине и в полете на самолете АН-12 вместе с автомобилем..

С 1973 г. интенсивные исследования в области БИНС начинаются в Киевском политехническом институте на приборостроительном факультете, где образуется лаборатория БИНС, которая носит в настоящее время имя Захарина М.И. Качественно новый скачок исследований в области БИНС произошел в 1983 г. после объединения в Межотраслевой научно-исследовательском институте «Ритм» при НТУУ «КПИ» научной школы М.И. Захарина «Теория и практика БИНС» с научной школой профессора Павловского М. А. «Гироскопические приборы и элементы». Это дало возможность объединить результаты разработки теории, принципов построения, моделей погрешностей и конкретных конструкций гироскопов и акселерометров, построенных на разных физических принципах, и их исследований с результатами разработки математического обеспечения, принципов построения, экспериментальной отработки технологий БИНС [5].

Эти технологии были внедрены в системах БИНС I-42-1С (первая в СССР сертифицированная авиационная БИНС), БИНС-77, БИНС-85 Московского института автоматики и телемеханики, которые устанавливаются на украинский самолет нового поколения АН-70, и изготовленных в институте «Ритм» опытных образцов курсовых вертикали на динамически настраиваемых

гироскопах (1991-1993 гг.), БИНС на лазерных и микромеханических гироскопах. Экспериментальные исследования лазерной БИНС в 1995 г. на подвижной лаборатории показали высокую эффективность алгоритмического обеспечения системы. Так при начальной погрешности системы примерно 10 км за час работы, при использовании специальных алгоритмов обработки информации для коррекции системы на остановках через 5 минут движения была достигнута ошибка (15-20) м практически не зависимо от времени работы. Проведенные испытания (2002 г.) микромеханического инерциального модуля, интегрированного со спутниковой навигационной системой, показали субметровую точность [6, 7].

В целом за более чем 30 летний период исследований в лаборатории инерциальных систем был создан замкнутый цикл технологий, который позволяет производить исследования проблем платформенных и бесплатформенных инерциальных навигационных систем (ИНС) путем моделирования на ЭВМ; синтезировать структуру ИНС для выполнения различных задач; решать основные схемные, программно-аппаратные проблемы построения БИНС (на уровне чувствительных элементов и системы в целом) для достижения необходимой точности и надежности за счет внутренних резервов и интеграции с другими источниками информации; калибровать систему на оборудовании низкой точности, проводить комплексные экспериментальные исследования характеристик ИНС в лабораторных и натуральных условиях [8].

Основу этих технологий составляет пакет методик, алгоритмов и программ, список и краткая характеристика которых приводится ниже.

1. ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

1.1. Калибровка на неподвижном основании (код РСФ)

Программа предназначена для обработки показаний датчиков системы, накопленных в результате реализации методики калибровки ее параметров (дрейфов гироскопов, смещений нулей акселерометров, масштабных коэффициентов акселерометров, перекосов осей чувствительности акселерометров, перекосов рамок карданова подвеса) на неподвижном основании (в лаборатории или на объекте) без использования поворотного стола и какой-либо внешней информации.

1.2. Калибровка на подвижном основании (код РСМ)

Программа предназначена для обработки показаний датчиков системы, накопленных в результате реализации методики калибровки ее параметров (дрейфов гироскопов, смещений нулей акселерометров, масштабных коэффициентов акселерометров) на подвижном основании.

1.3. Калибровка корпусного и курсового уходов платформы (код РСД)

Программа позволяет определить величины дрейфов горизонтальных гироскопов в зависимости от положения корпуса системы относительно направления на Север (курсовой уход) и от положения внутренней рамки относительно корпуса (корпусной дрейф) с целью их дальнейшей компенсации в процессе работы системы.

1.4. Выставка на неподвижном основании (код PAF)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для определения ориентации платформы относительно направления на Север и местной вертикали на неподвижном основании, а также для калибровки части параметров системы.

1.5. Выставка на качающемся основании (код PAR)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для определения ориентации платформы относительно направления на Север и местной вертикали на основании, которое совершает угловые и линейные колебания вокруг двух или трех осей, а также для калибровки части параметров системы.

1.6. Выставка на подвижном основании (код PAM)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для определения ориентации платформы относительно направления на Север и местной вертикали при установке на основание, которое перемещается в пространстве, а также для калибровки части параметров системы.

1.7. Автономная наземная навигация (код PNAL)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для автономного определения координат, скорости и ориентации автомобиля.

1.8. Автономная навигация для авиационной системы (код PNAА)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для автономного определения координат, скорости и ориентации гражданских самолетов.

1.9. Наземная навигация для интегрированной системы (код PNIL)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для совместной обработки показаний датчиков инерциальной системы и других источников информации (спутниковой навигационной системы, одометра, нулевой скорости на остановках объекта и т.п.). В результате этого значительно повышается точность определения выходных параметров (координаты, скорость, ориентация) за счет коррекции системы, а также уточнения начальной выставки платформы по курсу и вертикали и калибровки параметров системы.

1.10. Навигация для интегрированной авиационной системы (код PNIA)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для совместной обработки показаний датчиков инерциальной системы и других источников информации (спутниковая навигационная система, доплеровская система измерения скорости, высотомер и т.п.). В результате этого значительно повышается

точность определения выходных параметров (координаты, скорость, ориентация) за счет коррекции системы, а также уточнения начальной выставки платформы по курсу и вертикали и калибровки параметров системы.

1.11. Моделирование показаний датчиков системы в процессе калибровки (коды PMS-F, PMS-M и PMS-D)

Программы серии PMS предназначены для отладки программ обработки показаний датчиков PCF, PCM и PCD и их алгоритмов, а также для оценки точности калибровки параметров системы методом Монте-Карло.

1.12. Моделирование показаний датчиков системы в процессе выставки платформы (коды PMA-F, PMA-R и PMA-M)

Программы серии PMA предназначены для отладки программ выставки платформы PAF, PAR и PAM и их алгоритмов, а также для оценки точности выставки системы методом Монте-Карло.

1.13. Моделирование показаний датчиков системы в процессе движения (коды PMN-AL, PMN-AA, PMN-IL и PMN-IA)

Программы серии PMN предназначены для отладки программ навигации PNAL, PNAА, PNIL, PNIA и их алгоритмов, а также для оценки точности определения выходных параметров системы методом Монте-Карло.

2. ПРОГРАММЫ ДЛЯ БИНС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНЫХ, ВОЛОКОННЫХ И ДИНАМИЧЕСКИ-НАСТРАИВАЕМЫХ ГИРОСКОПОВ

2.1. Калибровка инерциального измерительного блока (ИИБ) БИНС на точных немеханических гироскопах с использованием поворотного стола низкой точности (код SCLH)

Программа предназначена для обработки показаний датчиков БИНС, накопленных в результате реализации методики **высокоточной** калибровки параметров ИИБ (дрейфов гироскопов, смещений нулей акселерометров, масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров, нелинейностей масштабных коэффициентов акселерометров, а также перекосов осей чувствительности датчиков). Для этого ИИБ поворачивается на углы кратные 90 град с погрешностью $\pm 1^0$ относительно вертикали и направления на Север на двухступенном или трехступенном поворотном столе. Программа предназначена для определения параметров ИИБ на точных **немеханических** гироскопах (например, лазерных).

2.2. Калибровка ИИБ БИНС на точных механических гироскопах с использованием поворотного стола низкой точности (код SCMН)

То же, что и в п.2.1, за исключением того, что программа предназначена для определения параметров ИИБ на точных **механических** гироскопах (например, точных динамически настраиваемых).

2.3. Калибровка ИИБ БИНС на грубых немеханических гироскопах с использованием поворотного стола низкой точности (код SCLL)

Программа предназначена для обработки показаний датчиков БИНС, накопленных в результате реализации методики **высокоточной** калибровки параметров ИИБ (дрейфов гироскопов, смещений нулей акселерометров, масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров, а также перекосов осей чувствительности датчиков). Для этого ИИБ вначале поворачивается на углы кратные 45^0 с погрешностью $\pm 10'$ относительно вертикали, а затем на углы кратные 90^0 с погрешностью $\pm 1^0$ относительно вертикали и направления на Север на двухступенном или трехступенном поворотном столе. Программа предназначена для определения параметров ИИБ на грубых **немеханических** гироскопах (например, волоконных).

2.4. Калибровка ИИБ БИНС на грубых механических гироскопах с использованием поворотного стола низкой точности (код SCML)

То же, что и в п.2.3, за исключением того, что программа предназначена для определения параметров ИИБ на грубых **механических** гироскопах (например, грубых динамически-настраиваемых).

2.5. Калибровка блока акселерометров на поворотном столе низкой точности (код SCA)

Программа предназначена для обработки показаний акселерометров, накопленных в результате реализации методики **высокоточной** калибровки блока акселерометров (смещений нулей, масштабных коэффициентов и перекосов осей чувствительности). Для этого ИИБ поворачивается на углы кратные 45^0 с погрешностью $\pm 10'$ относительно вертикали на двухступенном или трехступенном поворотном столе.

2.6. Выставка на неподвижном основании (код SAF)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для определения ориентации ИИБ относительно направления на Север и местной вертикали на неподвижном основании, а также для калибровки части параметров ИИБ.

2.7. Выставка на качающемся основании (код SAR)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для определения ориентации ИИБ относительно направления на Север и местной вертикали на основании, которое совершает угловые и линейные колебания вокруг двух или трех осей, а также для калибровки части параметров ИИБ.

2.8. Выставка на подвижном основании (код SAM)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для определения ориентации ИИБ относительно направления на Север и местной вертикали при установке на основание, которое перемещается в пространстве, а также для калибровки части параметров ИИБ.

2.9. Автономная наземная навигация (код SNAL)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для автономного определения координат, скорости и ориентации автомобиля.

2.10. Автономная навигация для авиационной системы (код SNAA)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для автономного определения координат, скорости и ориентации гражданских самолетов.

2.11. Наземная навигация для интегрированной системы (код SNIL)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для совместной обработки показаний датчиков БИНС и других источников информации (спутниковой навигационной системы, одометра, нулевой скорости на остановках объекта и т.п.). В результате этого значительно повышается точность определения выходных параметров (координаты, скорость, ориентация) за счет коррекции системы, а также уточнения начальной выставки ИИБ по курсу и вертикали и калибровки его параметров.

2.12. Навигация для интегрированной авиационной системы (код SNIA)

Программа реализует алгоритмы, предназначенные для совместной обработки показаний датчиков БИНС и других источников информации (спутниковая навигационная система, доплеровская система измерения скорости, высотомер и т.п.). В результате этого значительно повышается точность определения выходных параметров (координаты, скорость, ориентация) за счет коррекции системы, а также уточнения начальной выставки ИИБ по курсу и вертикали и калибровки его параметров.

2.13. Высокоточное определение ориентации при высокочастотных угловых колебаниях (код SO)

Программа реализует алгоритм, который обеспечивает максимально возможную точность решения задачи ориентации при предельно возможной полосе частот угловых колебаний объекта. Часть программы может быть реализована в простом цифровом автомате, что позволяет существенно уменьшить загрузку центрального вычислителя БИНС.

2.14. Моделирование показаний датчиков БИНС в процессе калибровки (коды SMC-LH, SMC-MH, SMC-LL, SMC-ML)

Программы серии SMC предназначены для отладки программ обработки показаний датчиков SCLH, SCMН, SCLL, SCML и их алгоритмов, а также для оценки точности калибровки параметров ИИБ методом Монте-Карло.

2.15. Моделирование показаний датчиков БИНС в процессе выставки (коды SMA-F, SMA-R и SMA-M)

Программы серии SMA предназначены для отладки программ выставки SAF, SAR и SAM и их алгоритмов, а также для оценки точности выставки системы методом Монте-Карло.

2.16. Моделирование показаний датчиков системы в процессе движения (коды SMN-AL, SMN-AA, SMN-IL и SMN-IA)

Программы серии SMN предназначены для отладки программ навигации SNAL, SNAA, SNIL, SNIA и их алгоритмов, а также для оценки точности определения выходных параметров системы методом Монте-Карло.

2.17. Моделирование импульсов выходных сигналов лазерных гироскопов (код SMO)

Программа предназначена для отладки программы SO, а также для оценки точности определения параметров ориентации алгоритмом программы SO.

3. ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ОТЛАДКИ СИСТЕМ

3.1. Оценка точности определения выходных параметров инерциальной системы по заданной точности гироскопов и акселерометров и заданной траектории движения (код COV)

Программа предназначена для определения СКО погрешностей определения выходных параметров инерциальной системы (координаты, скорость ориентация) по заданной точности гироскопов и акселерометров и заданной траектории движения объекта. Программа предназначена для исследования свойств навигационных систем и обоснования принятия решений при их проектировании.

3.2. Оптимизация параметров конструкции ИИБ на лазерных гироскопах (код INF) [8]

Программа позволяет оптимизировать параметры ИИБ БИНС (характеристики системы амортизации, виброподвесы гироскопов, конструкция рамы) с точки зрения минимизации влияния на погрешности БИНС взаимного влияния виброподвесов гироскопов и вибраций основания. Программа предназначена для выбора рациональных технических решений при проектировании ИИБ БИНС.

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И КОМПЛЕКТНОСТЬ ПОСТАВКИ ПРОГРАММ

4.1. Язык программирования – С++ (за исключением моделирующих программ серий PM и SM).

4.2. Программы поставляются для работы на персональном компьютере в операционных системах Windows или DOS по желанию Заказчика.

4.3. Программы (за исключением PM, SM, COV, INF) поставляются в трех комплектах:

4.3.1. Комплект №1: Исполняемый файл программы и инструкция пользователя.

4.3.2. Комплект №2: Комплект №1, исходный текст программы и описание формул, используемых в алгоритмах.

4.3.3. Комплект №3: Комплект №2, отчет с выводом всех формул.

4.4. Моделирующие программы серий PM, SM, COV, INF поставляются в комплектации: исполняемый файл и исходный текст программы, описание принципа работы.

4.5. Интерфейс пользователя программ, комментарии в программах выполняются на английском языке. Техническая документация поставляется по желанию Заказчика на русском или/и на английском языках.

4.6. При желании Заказчика программы адаптируются к особенностям конкретных систем.

4.7. Высокое качество программ обеспечивается специальной технологией разработки, отладки и сдачи программ Заказчику, состоящей из шести этапов:

- 1) Оценка точности выходных параметров программы при помощи программы ковариационного анализа COV для заданных Заказчиком параметров системы и условий ее применения.
- 2) Разработка программы, реализующей алгоритмы, и ее отладка при помощи моделирующей программы для заданных Заказчиком условий.
- 3) Оценка точности разработанной программы методом Монте-Карло путем последовательного многократного запуска моделирующей программы и программы, реализующей алгоритмы. При каждом запуске датчиком случайных чисел генерируется новая реализация погрешностей датчиков и возмущающих факторов. Оценки СКО погрешностей выходных параметров программы вычисляются по множеству реализаций.
- 4) Проведение натурных экспериментов по согласованной с Заказчиком методике, обработка программой полученных данных и оценка СКО погрешностей выходных параметров программы.
- 5) Сравнение оценок точности программы, полученных на этапах 1, 3, 4, между собой. В случае их существенных отличий, выясняются причины и, при необходимости, программа дорабатывается, а этапы 1-5 циклически повторяются до получения максимально возможного результата для заданных Заказчиком условий.
- 6) Обучение специалистов Заказчика правилам работы с программой.

Список использованной литературы

1. Захарин М.И. Некоторые вопросы кинематики инерциальных систем навигации. – Киев: КВИАВУ, 1952.-100 с.

2. Захарин М.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных навигационных систем. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.

3. Захарин М.И., Панов А.П., Златкин Ю.М. 40 лет развития теории бесплатформенных инерциальных систем в Украине // Гироскопия и навигация, 1997. № 15.С. 82 – 85.

4. Захарін М.І. Головні результати розробки теорії безплатформових інерціальних навігаційних систем (БІНС), добуті київською секцією «Ради з проблем навігації та керування рухом» при АН України // Механіка гіроскопічних систем, 1997. №14. С. 108-112.

5. Леонєць О.А. Досягнення Міжгалузевого інституту проблем механіки “Ритм” при НТУУ “КПІ” в розвитку технологій безплатформових інерціальних навігаційних системах // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 1999. С. 3-9.

6. Леонєц А.А., Романовский В.А. и др. Разработка и натурные испытания микромеханической инерциально-спутниковой системы предупреждения съезда с дороги легковых автомобилей // Збірник доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції “Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки”, 2003. С. 106-118.

7. Леонєць О.А., Романовський В.О., Павлюк О.Є., Брід Д. Результати досліджень мікро механічної інерціально-супутникової системи для легкових автомобілей // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.-2004.№1.С.71-78.

8. Леонєц А.А. Результати досліджень взаємного впливу віброподвесов лазерних гіроскопов в безплатформенних інерціальних навігаційних системах // Збірник доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції “Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки”, 2001. С. 198-206.