

УДК 629.056.6

В.И. КОРТУНОВ¹, Г.А. ПРОСКУРА¹, А.С. КРАВЧУК¹, О.В. СОЛОВЬЕВ²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Государственное предприятие «ЧАРЗ», Украина***АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ БИНС С ОПТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ**

Показана возможность коррекции ошибок БИНС с использованием данных от оптического датчика. Рассмотрены вопросы анализа наблюдаемости расширенного набора инструментальных погрешностей интегрированной бесплатформенной инерциальной системы навигации. Проведен анализ наблюдаемости инструментальных ошибок интегрированной навигационной системы для различных комбинаций погрешностей чувствительных элементов в предположении наличия прямого измерения угловых параметров летательного аппарата. Анализируются результаты оценивания ошибок на этапе моделирования полетов.

Ключевые слова: инструментальные погрешности, коррекция БИНС, точность оценивания ошибок, оптический датчик.

Введение

Повышение точности интегрированных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) напрямую зависит от точности оценивания их ошибок. Широкое применение для решения задачи оценивания получили рекурсивные алгоритмы, известные как фильтр Калмана, который позволяет получать устойчивые оценки в условиях нестационарности системы. Одним из важных условий, соблюдение которого обязательно для работы такого фильтра, является наблюдаемость динамической системы. Поэтому, первым этапом построения алгоритма фильтра Калмана является анализ наблюдаемости ошибок инерциальной системы, позволяющий сформировать набор инструментальных погрешностей чувствительных элементов, оцениваемых с требуемой точностью.

Анализ наблюдаемости включает проверку условий полной наблюдаемости, выявление ненаблюдаемых координат, поиск способов улучшения наблюдаемости. В работах [1, 2] предлагается в набор оцениваемых инструментальных погрешностей датчиков включать смещения нулей гироскопов и акселерометров, для которых выполняется условие полной наблюдаемости. Однако дальнейшее расширение вектора ошибок БИНС масштабными коэффициентами датчиков затруднено, вследствие отсутствия их полной наблюдаемости [3]: в таком случае масштабные коэффициенты не идентифицируются, что влияет на качество оценивания смещений нулей акселерометров. Этот факт не позволяет провести полную компенсацию таких погрешностей, и существует их остаточное влияние на навигационные параметры летательного аппарата (ЛА), что под-

тверждается результатами разностороннего анализа точности интегрированной БИНС/GPS системы. Эффективным путем решения этой проблемы является расширение вектора наблюдения комплексной навигационной системы угловыми параметрами ЛА, что становится возможным, например, при интегрировании БИНС с оптической системой [4].

Интегрирование БИНС с оптическим датчиком

Оптическая камера описывается моделью перспективной проекции, преобразующей трехмерные координаты объекта в двумерное изображение. Очевидно, что при движении камеры последовательно получаемые изображения будут изменяться, а причиной этих изменений будут параметры матрицы, описывающей положение системы координат камеры относительно навигационной системы координат, в которой заданы координаты точки. Такие изменения в последовательности изображений являются геометрическими искажениями изображения и содержат в себе всю необходимую информацию.

Классический подход к решению этой задачи – нахождение *tip некоторого функционала*, при котором два изображения будут иметь минимум отличий, а параметры преобразования второго изображения и будут искомыми параметрами. Решение задачи оценки параметров геометрических преобразований является сложным, и во многих случаях стараются обойтись моделью движения с меньшим набором параметров, что приводит к появлению погрешностей и ограничений в применении данных методов. Самыми распространенными и широко используемыми методами оптической навигации

являются корреляционно-экстремальные методы, позволяющие по ранее записанному изображению карты производить точную навигацию и коррекцию БИНС. Современными наследниками этих методов являются методы, использующие известные опорные точки местности. В современной литературе встречается множество модификаций этих методов навигации на основе SLAM, но у всех этих методов есть один серьезный недостаток – необходимость иметь ранее подготовленную карту с опорными точками.

Наиболее интересными, по нашему мнению, являются методы, работающие по оптическому потоку без карты местности. Основой данных методов является определение смещения между двумя точками или изображениями. При использовании проективного преобразования относительное смещение в координатах камеры будет пропорционально линейному смещению, умноженному на некоторый коэффициент. Такой коэффициент обратно пропорционально зависит от дальности до плоскости сцены.

Сложной проблемой с точки зрения оптической системы является вычисление полного набора параметров геометрических преобразований, но в то же время получение оптической системой углов крена и тангажа существенно улучшает наблюдаемость ошибок в фильтре Калмана. С этой целью предлагается многоканальный оптический метод определения крена и тангажа ЛА в условиях полета над горизонтальной поверхностью. К достоинствам такого оптического метода, кроме его простоты, относят отсутствие карты местности, отсутствие зависимости от линейных ускорений и высоты, определение истинной высоты над поверхностью земли, определение угла сноса, определение углов крена и тангажа, возможность автономной работы. К недостаткам можно отнести некоторые ограничения, а именно:

– необходимость полета над горизонтальной поверхностью;

– необходимость отсутствия угловой скорости в курсовом канале;

– необходимость освещения подстилающей поверхности, если датчики работают в оптическом диапазоне.

Таким образом, оптическую камеру можно использовать либо в автономном либо в интегрированном режиме, что позволяет качественно улучшить наблюдаемость ошибок инерциальной системы.

Анализ наблюдаемости и обнаруживаемости инструментальных погрешностей БИНС

В работе [2] подробно описаны условия наблюдаемости и обнаруживаемости линейных динамических систем. В соответствии с этими условиями был проведен анализ наблюдаемости ошибок интегрированной БИНС системы с использованием различных моделей инструментальных погрешностей гироскопов. При этом измеряемыми координатами вектора ошибок считались ошибки определения параметров ориентации ЛА.

Объединенный результат наблюдаемости вектора ошибок интегрированной БИНС приведен в табл. 1.

Для проверки полученных теоретических результатов анализа наблюдаемости и обнаруживаемости инструментальных погрешностей интегрированной БИНС моделировалась работа расширенного фильтра Калмана, применительно к различным видам расширения вектора ошибок интегрированной системы. Моделирование осуществлялось с использованием средств пакета MATLAB.

Ошибки оценок погрешностей гироскопов определялись при сравнении значений оценок, вычисляемых в фильтре Калмана (ФК), с их заданными модельными значениями.

Таблица 1

Объединенный результат наблюдаемости инструментальных погрешностей БИНС

<i>Вектор оцениваемых ошибок БИНС</i>	<i>Степень наблюдаемости</i>
Кватернион ориентации, смещения нулей гироскопов	Вполне наблюдаемый
Кватернион ориентации, смещения нулей гироскопов, погрешности масштабных коэффициентов (МК) гироскопов (модели типа констант)	Не наблюдаемый (ранг матрицы наблюдаемости равен 7 при порядке вектора ошибок 10)
Кватернион ориентации, смещения нулей гироскопов (модели типа винеровского процесса первого порядка), погрешности масштабных коэффициентов (МК) гироскопов (модели типа констант)	Вполне наблюдаемый
Кватернион ориентации, смещения нулей гироскопов, погрешности масштабных коэффициентов (МК) гироскопов (модели типа винеровского процесса первого порядка), угловые величины неортогональностей измерительных осей гироскопов (модели типа констант)	Не наблюдаемый (ранг матрицы наблюдаемости равен 13 при порядке вектора ошибок 16)
Кватернион ориентации, угловые величины неортогональностей измерительных осей гироскопов (модели типа винеровского процесса первого порядка)	Вполне наблюдаемый

При расширении вектора ошибок моделями смещений нулей гироскопов, полученные фильтром Калмана оценки сходятся к заданным величинам. Также обеспечивается сходимость оценок смещений нулей (модели типа винеровского процесса первого порядка) и погрешностей МК гироскопов (модели типа констант). В варианте расширения вектора ошибок моделями угловых величин неортогональностей измерительных осей гироскопов типа винеровского процесса первого порядка, полученные ФК оценки также сходятся к заданным величинам.

Результаты моделирования оценивания инструментальных погрешностей гироскопов фильтром Калмана подтверждают результаты анализа наблюдаемости инструментальных погрешностей БИНС.

Заклучение

Проведенный анализ наблюдаемости различных комбинаций погрешностей гироскопов в предположении наличия прямого измерения угловых параметров ЛА позволил сформировать вполне наблюдаемый набор, включающий смещения нулей и погрешности МК гироскопов, а также набор, включающий угловые величины неортогональностей измерительных осей гироскопов. Проведенный анализ

точности системы методом математического моделирования работы фильтра Калмана показал, что оценки инструментальных погрешностей при таком расширении сходятся к заданным величинам, что позволяет впоследствии эффективно использовать их в алгоритме коррекции интегрированной БИНС.

Литература

1. Кортунув В.И. Экспериментальное исследование точности коррекции интегрированной миниатюрной БИНС / В.И. Кортунув, Г.А. Проскура, А.С. Кравчук // *Електроніка та системи управління*. – 2008. – № 1 (15). – С. 26-33.
2. Кортунув В.И. Наблюдаемость и обнаруживаемость инструментальных ошибок бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.И. Кортунув, Г.А. Проскура // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 3 (29) – С. 31-38.
3. Accuracy analysis of strapdown inertial navigation systems / V. Kortunov, I. Dybska, G. Proskura, T. Trachsel // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т.13, №4. – С. 40-48.
4. Kim J. 6DoF SLAM Aided GNSS/INS Navigation in GNSS Denied and Unknown Environments / J. Kim, S. Sukkarier // *Journal of Global Positioning System*. – 2005. – Vol.4, №1 – 2. – P. 120-128.

Поступила в редакцию 30.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. авиационных приборов Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ІНТЕГРОВАНОЇ БІНС З ОПТИЧНИМ ДАТЧИКОМ

В.І. Кортунув, Г.А. Проскура, О.С. Кравчук, О.В. Соловйов

Показана можливість корекції помилок БІНС з використанням даних від оптичного датчика. Розглянуті питання аналізу спостережуваності розширеного набору інструментальних погрешностей інтегрованої безплатформенної інерціальної системи навігації. Проведений аналіз спостережуваності інструментальних помилок інтегрованої навігаційної системи для різних комбінацій погрешностей чутливих елементів в припущенні наявності прямого виміру кутових параметрів літального апарату. Аналізуються результати оцінювання помилок на етапі моделювання польотів.

Ключові слова: інструментальні погрешності, корекція БІНС, точність оцінювання помилок, оптичний датчик.

THE ACCURACY ANALYSIS OF THE INTEGRATED INS WITH AN OPTICAL SENSOR

V.I. Kortunov, G.A. Proskura, A.S. Kravchuk, O.V. Solovyev

The possibility of the correction of INS errors is shown with the use of data from an optical sensor. The questions of observability analysis of the extended set of instrumental errors of the integrated strap down inertial system of navigation are considered. The observability analysis of instrumental errors of the integrated navigational system was made for different combinations of sensors errors in supposition of the presence of the direct measuring of angular parameters of the aircraft. The results of evaluation of the errors are analyzed on the stage of flight simulation.

Key words: instrumental errors, correction of INS, exactness of evaluation of errors, optical sensor.

Кортунув Вячеслав Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры приёма, передачи и обработки сигналов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: vkortunov@yandex.ru.

Проскура Галина Анатольевна – канд. техн. наук, ассистент кафедры приёма, передачи и обработки сигналов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Кравчук Александр Сергеевич – ст. преподаватель кафедры приёма, передачи и обработки сигналов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: as_kravchuk@mail.ru.

Соловьёв Олег Витальевич – канд. техн. наук, начальник Государственного предприятия «ЧАРЗ», Харьков.