

УДК 629.7.05

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ НАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ БПЛА С ФУНКЦИЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗОВ

К.К. Веремеенко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4
E-mail: nio3@mai.ru

Д.А. Антонов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4
E-mail: nio3@mai.ru

М.В. Жарков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4
E-mail: nio3@mai.ru

А.Н. Пронькин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4
E-mail: nio3@mai.ru

И.М. Кузнецов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4
E-mail: nio3@mai.ru

Ключевые слова: навигационно-посадочный комплекс, интегрированная навигационная система, оптимальная обработка навигационной информации, целостность навигационных данных, отказ навигационной системы

Аннотация: Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для все более широкого круга задач, которые предъявляют высокие требования к характеристикам их бортового навигационного оборудования. При этом необходимо не только обеспечить требуемую точность навигационного обеспечения, но и надежность получения информации. В этой связи в докладе представлены результаты разработок навигационных комплексов малогабаритных БПЛА, информационным ядром которых является бесплатформенная инерциальная навигационная система, корректируемая на различных этапах полета от различных бортовых и наземных средств. Рассматриваемый комплекс позволяет обеспечивать информационную поддержку управления на всех этапах полета от взлета до посадки. Приводится структура комплекса, описание его программно-математического обеспечения и результаты имитационного и полунатурного моделирования режимов его работы.

1. Введение

Вопросам создания бортовых систем навигации и управления беспилотных летательных аппаратов посвящено значительное число работ [1-7]. Существенный опыт создания систем навигации и ориентации для различных типов БПЛА накоплен в Московском авиационном институте. В докладе приводятся результаты обобщения накопленного опыта и представляются структуры и программно-математическое обеспечение навигационно-посадочных комплексов (НПК) малогабаритных БПЛА, обеспечивающих в том числе и функцию посадки.

Одним из центральных вопросов доклада является рассмотрение возможностей обнаружения отказов аппаратуры в бортовом навигационном комплексе и прежде всего спутниковой навигационной системы. В основе рассматриваемого подхода лежит принцип комплексирования измерений разнородных датчиков навигационной информации и реализация в рассматриваемом комплексе функции бортового автономного контроля целостности (Airborne Autonomous Integrity Monitoring AAIM).

Теоретический материал доклада подкреплен результатами имитационного и полунатурного моделирования, показывающими потенциальную точность оценивания параметров и подтверждающими работоспособность функции обнаружения отказов.

2. Состав и структура комплексов

Информационной основой рассматриваемых в докладе комплексов является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая в зависимости от типоразмера БПЛА может строиться на микромеханических или волоконно-оптических гироскопах [6-8] и различных акселерометрах, при этом при выборе датчика предпочтение отдается отечественным изделиям. Каждая из рассматриваемых структур имеет свои особенности. Так в работе [9] рассматривается малогабаритный навигационный модуль, включающий микромеханическую бесплатформенную инерциальную навигационную систему, спутниковую навигационную систему, микромеханический магнитный компас и микромеханический баровысотомер. Особенностью структуры этого модуля является наличие трех встроенных спутниковых навигационных приемников, обеспечивающих фазовые измерения и определение параметров ориентации объекта. Это позволяет не только радикально решить проблему повышения точности определения курсового угла, но и существенно повысить общую точность работы системы, реализованную по слабосвязанной схеме, а также повысить наблюдаемость оценок ряда параметров и снизить время сходимости оценок в фильтре Калмана. Система прошла полунатурные испытания. Развитие этого подхода на микромеханических датчиках нашло отражение в образцах, представленных в работах [10-13], причем ряд из них был использован не только для установки на БПЛА, но и для слежения за автомобильным транспортом.

При возможности использования более габаритных датчиков и, соответственно, обладающих более высокими характеристиками, использовались волоконно-оптические гироскопы отечественной разработки – ОИУС-501 и ОИУС-1000. Эти датчики вошли в состав навигационных комплексов различного назначения, в частности, для БПЛА с взлетной массой более 200 кг [16].

Разрабатываемые навигационные комплексы обладают рядом структурных особенностей, позволяющих решать некоторые специфические задачи, расширяющие возможности БПЛА. В частности, рассматривается вариант трансферной выставки в полете, при котором используется информация от самолет-носителя, особенностью которой

является наличие информации о разности пилотажных углов, полученных от системы носителя и выставляемой системы БПЛА [15]. Такой подход позволяет улучшить наблюдаемость ряда параметров вектора состояния выставляемой системы, и, как следствие, сократить время выставки и повысить точность оценивания, прежде всего параметров азимутального канала.

Другой особенностью разрабатываемых комплексов является возможность организации на их основе режима посадки с использованием сигналов наземного дополнения спутниковых навигационных систем. В качестве таких дополнений рассматриваются станции дифференциальных поправок и псевдоспутники [16, 17].

Одной из актуальных задач практической авиации является предотвращение выкатывания летательных аппаратов за пределы рулежных дорожек аэродрома при рулении, а также предотвращение столкновений при этом с другими аппаратами и транспортными средствами. Разрабатываемые комплексы могут быть обеспечены такой функцией при условии организации на аэродроме системы слежения за наземным транспортом. В докладе приводится структура такой системы и особенности ее взаимодействия с бортовым навигационным комплексом БПЛА [14, 18].

Учитывая возрастающие требования по точности и надежности навигационного обеспечения, для разрабатываемых систем предусматривается возможность организации автономного контроля целостности навигационных данных на основе комплексной обработки информации от всей совокупности бортовых информационных систем. С этой целью реализуется функция бортового автономного контроля целостности (Airborne Autonomous Integrity Monitoring, AAIM)

3. Программно-математическое обеспечение комплекса

Все рассмотренные выше НПК имеют унифицированное математическое описание и в настоящем разделе приводится его ядро, позволяющее построить процедуру оптимального оценивания параметров состояния и организовать контроль целостности данных. В основе комплекса предполагается трехканальная БИНС (в случае двухканального варианта, из приводимого описания достаточно удалить вертикальный канал). Выбранная модель ошибок БИНС подробно описана в [6, 7]. Уравнения ошибок, записанные в осях географической системы координат в форме Коши, имеют вид [6, 7]:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Omega_y^2 + \Omega_z^2 - \omega_0^2 & \dot{\Omega}_z - \Omega_x \Omega_y & -\dot{\Omega}_y - \Omega_x \Omega_z & 0 & 2\Omega_z & -2\Omega_y \\ -\dot{\Omega}_z - \Omega_x \Omega_y & \Omega_x^2 + \Omega_z^2 - \omega_0^2 & \dot{\Omega}_x - \Omega_y \Omega_z & -2\Omega_z & 0 & 2\Omega_x \\ \dot{\Omega}_y - \Omega_x \Omega_z & -\dot{\Omega}_x - \Omega_y \Omega_z & \Omega_x^2 + \Omega_y^2 + 2\omega_0^2 & 2\Omega_y & 2\Omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \\
(1) \quad &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 0 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta n_x \\ \Delta n_y \\ \Delta n_z \end{bmatrix}; \\
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \Omega_z & -\Omega_y \\ -\Omega_z & 0 & \Omega_x \\ \Omega_y & -\Omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \Omega_x \\ \Delta \Omega_y \\ \Delta \Omega_z \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

где x_1, x_2, x_3 – ошибки определения координат и высоты БИНС в земной нормальной системе координат; x_4, x_5, x_6 – производные компонент x_1, x_2, x_3 (компоненты ошибок БИНС по скорости); α, β, γ – угловые погрешности ориентации измерительного трехгранника относительно вычисленного (компоненты вектора малого поворота Θ); ω_0 – собственная частота колебаний ошибок БИНС, частота Шулера; $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z, \dot{\Omega}_x, \dot{\Omega}_y, \dot{\Omega}_z$ – проекции вектора абсолютной угловой скорости вращения географического трехгранника и их производные; n_x, n_y, n_z – проекции вектора кажущегося ускорения центра масс объекта на оси географического трехгранника; $\Delta \Omega_{x,y,z}, \Delta n_{x,y,z}$ – инструментальные дрейфы гироскопов и ошибки акселерометров, приведенные к осям земной нормальной системе координат, определяемые путем пересчета погрешностей соответствующих датчиков из осей измерительного трехгранника в оси нормальной земной системы координат.

Для использования оптимального фильтра Калмана, система (1) должна быть приведена в пространство состояний динамической системы, задаваемой следующей формой [19]:

$$(2) \quad \dot{X} = FX + GW,$$

где вектор состояния системы:

$$(3) \quad X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & \alpha & \beta & \gamma & \Delta \Omega_x & \Delta \Omega_y & \Delta \Omega_z & \Delta n_x & \Delta n_y & \Delta n_z \end{bmatrix}^T.$$

Вид матрицы динамики системы F определяется системами (1) и (2) и приведен, например, в работах [6, 15].

При решении задач комплексирования различных навигационных приборов, в частности при использовании фильтра Калмана в задачах коррекции инерциальных систем, применяется способ формирования вектора измерений в виде разности выходных сигналов корректируемой и одной из корректирующих навигационных систем, содержащих информацию об одной и той же физической величине [6]. В рассматриваемых комплексах измерения формируются по следующей информации: 1) по разности координат; 2) по рассогласованию углов ориентации; 3) по разности проекций скоростей.

В общем виде в форме пространства состояний уравнение измерений записывается в форме [19]:

$$(4) \quad \bar{Z} = H\bar{x} + \bar{V},$$

где \bar{Z} – вектор измерений, \bar{x} – вектор состояния, H – матрица измерений, \bar{V} – вектор шумов измерений. Вид матрицы измерений H определен в работе [15].

Базируясь на соотношениях (1)-(4), строится процедура оптимального оценивания расширенного вектора состояния (3) с использованием формы Джозефа, обеспечивающего лучшие характеристики вычислительного процесса.

Алгоритмы контроля целостности, реализующие функцию ААИМ, строятся в соответствии с методикой, изложенной в работе [19].

4. Результаты имитационного, полунатурного моделирования

Для подтверждения работоспособности и получения точностных характеристик разработанных систем было проведено имитационное и полунатурное моделирование. При полунатурном моделировании использовались данные от имитатора спутниковых навигационных сигналов с целью получения более достоверных результатов моделирования в части анализа особенностей работы алгоритмов обнаружения отказов спутниковых навигационных систем.

Проведенное моделирование показало, что точность интегрированных систем описываемой структуры лежит в требуемых пределах, как в режимах маршрутного полета, так и в режиме посадки при условии использования данных корректоров, соответствующих заявляемому параметру. Алгоритмы контроля целостности формируют сигналы об отказах систем, при этом «медленные» отказы, связанные с накоплением ошибок, например, от уводящих помех спутниковых навигационных систем, приводят к некоторому ухудшению точности работы системы.

5. Заключение

Представляемые в докладе материалы позволяют заключить, что разработанные структуры и алгоритмы для НПК позволяют реализовывать основные их функции и режимы, включая режимы посадки и руления на территории аэродрома, а также вести бортовой контроль целостности навигационных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Задание №8.2118.2017/4.6 на выполнение НИР в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности).

Список литературы

1. Распопов В. Я, Товкач С. Е. Авионика малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Мир авионики. 2009. № 3. С. 39-47
2. Andrievsky B.R., Kuznetsov N.V., Leonov G.A., Seledzh S.M. UAV Control with Switched GNSS Estimator Navigation System // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, No. 9. P. 126-131.
3. Шаров С.Н., Андриевский Б.Р., Дворяшин М.С., Петухова Е.С Технические пути обеспечения посадки беспилотных летательных аппаратов на судно // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 4 (74). С. 58-77.

4. Gebre-Egziabher D., Taylor B. Impact and Mitigation of GPS-Unavailability on Small UAV Navigation, Guidance and Control. Tech. Rep. 2012-2, University of Minnesota, Department of Aerospace Engineering and Mechanics, Nov. 2012.
5. Murch A., Paw Y., Pandita R., Li Z., Balas G. A Low Cost Small UAV Flight Research Facility // 1st CEAS Specialist Conference on Guidance, Navigation, and Control, Confederation of European Aerospace Societies, April 2011.
6. Алешин Б.С., Веремеенко К.К., Черноморский А.И. и др. Ориентация и навигация подвижных объектов. Современные информационные технологии / Под ред. Алешина Б.С., Веремеенко К.К., А.И. Черноморского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с.
7. Козорез Д.А., Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Красильщиков М.Н. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
8. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Грязин Д.Г., Некрасов Я.А., Евстифеев М.И., Блажнов Б.А., Аксентенко В.Д. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Гироскопия и навигация. 2008. № 3 (62). С. 3-12.
9. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Жарков М.В., Зимин Р.Ю. Малогабаритная комплексная система навигации и ориентации // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. ФГУП РФ ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 160.
10. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., Zimin R.Y. Experimental Automobile Integrated Navigation Module // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2008. Vol. 23, No. 12. P. 20-23
11. Пронькин А.Н., Кузнецов И.М., Веремеенко К.К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // Труды МАИ. 2010. № 41. С. 1-13.
12. Веремеенко К.К., Антонов Д.А., Жарков В.М., Зимин Р.Ю., Чернодубов А.Ю. Малогабаритная интегрированная навигационная система // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. ФГУП РФ ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 188-190
13. Veremeenko K.K., Antonov D.A., Zharkov M.V., Zimin R.Y., Tchernodoubov A.Y. Small-Sized Integrated Navigation System // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2011. Vol. 26, No. 3. С. 39-41.
14. Veremeenko K.K. On a Concept of Creation of an Airport Advanced Surface Movement and Ground Control System // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences ICAS-2014. St. Petersburg, Sept. 7-12, 2014.
15. Веремеенко К.К., Савельев В.М. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата в полете // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2013. № 1. С. 111.
16. Веремеенко К.К., Антонов Д.А., Жарков В.М., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Малогабаритный интегрированный навигационно-посадочный комплекс переменной структуры. // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. ФГУП РФ ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 236-239.
17. Веремеенко К.К., Пронькин А.Н. О некоторых результатах исследования интегрированной системы посадки БЛА, использующей сигналы псевдоспутников // Новости навигации. 2012. № 3. С. 16-22.
18. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Отказоустойчивая комплексная навигационная система аэропортового транспортного средства // XXIV Санкт-Петербургская Международная Конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. ФГУП РФ ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 160-164.
19. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации Часть 2 / Изд. 3-е, исправленное и дополненное. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2017.