

УДК 681.5

С.Н. ФИРСОВ, КУОК ТУАН ДО, О.Ю. ЗЛАТКИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОСТРОЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрено построение отказоустойчивого блока акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с применением системного подхода, включающего в себя диагностирование технического состояния блока акселерометров и гибкого восстановления его работоспособности на основании результатов диагностирования

отказоустойчивость, диагностирование, навигация, акселерометр, восстановление работоспособности, дихотомическое дерево, диагностическая модель, отказ

Введение

В настоящее время широкое распространение получило использование бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) для определения параметров движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В таких системах навигации чувствительные элементы (ЧЭ) – акселерометры и измерители параметров ориентации (датчики угловых скоростей, гироскопические измерители угла, датчики углового ускорения и др.) – жестко устанавливаются на корпусе БПЛА [1, 2]. При этом количество измерителей должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить получение информации о векторе кажущегося ускорения объекта, на котором установлены измерители, и векторной величине (например, о векторе абсолютной угловой скорости), характеризующей вращение, что объясняет такое многообразие различных схем построения БИНС [2 – 4].

Анализ существующих вариантов построения БИНС показывает, что компоновка всех БИНС направлена либо на решение задачи повышения точности определения параметров полета БПЛА, либо на достижение абсолютной автономности работы БИНС, либо на решение задачи начальной выставки

и снижение ее влияния на точность БИНС. Кроме того, все существующие варианты БИНС не интегрируют своей компоновкой решения указанных задач, а также вопрос надежности БИНС решается путем формирования требований по надежности к ее элементам (акселерометры, ДУС и другие измерительно-преобразовательные устройства), что в некоторых вариантах приводит к физической не реализуемости БИНС из-за низкой точности и надежности ЧЭ. Таким образом, является актуальной задача построения блоков ЧЭ БИНС, к которым относится блок акселерометров, на имеющейся элементной базе, которые бы удовлетворяли всем требованиям современной БИНС БПЛА, без улучшения характеристик самих ЧЭ.

1. Структура отказоустойчивого блока акселерометрических датчиков БИНС БПЛА

Наиболее распространенный вариант построения блока акселерометров (БА) в современных БИНС БПЛА – три акселерометра, оси чувствительности которых ортогональны друг другу и совпадают (или параллельны) с осями связанной с БПЛА системой координат. Такое построение БА является наиболее

простым с точки зрения обработки информации, но не устойчиво к возникающим в процессе эксплуатации отказам, что приводит к снижению качества получаемой информации. Указанные недостатки БА не присущи новой компоновке акселерометров, состоящей из четырех акселерометров.

Вариант отказоустойчивого БА БИНС БПЛА, состоящего из 4-х акселерометров, представлен на рис. 1. Для простоты объяснения преимущества такого расположения акселерометров в БА предположим, что центр измерительного трехгранника совпадает с центром масс ЛА. Оси чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z совпадают с осями связанной с БПЛА системой координат Ox, Oy, Oz соответственно. Все три датчика располагаются на расстоянии R от начала системы координат. Ось чувствительности акселерометра A_0 совпадает с диагональю куба образованного осями чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z . От начала координат датчик A_0 расположен на расстоянии $\sqrt{3}R$.

Докажем обоснованность такого расположения датчиков первичной информации БИНС ЛА.

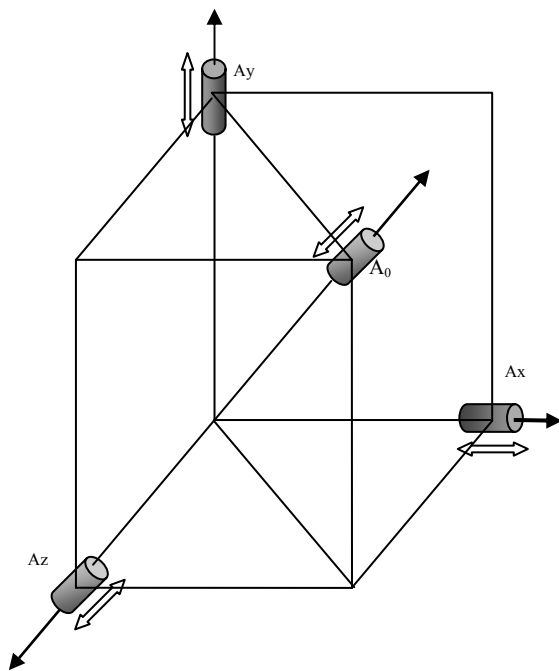


Рис. 1. Расположение акселерометров в отказоустойчивом БА БИНС БПЛА

2. Математическое описание отказоустойчивого БА БИНС БПЛА

Учитывая расположение акселерометров (рис. 1) и влияние на показание акселерометров проекций угловой скорости на оси связанной системы координат, значения выходных сигналов A_x, A_y, A_z будут определяться следующими выражениями:

$$a'_x = a_x - (\omega_y^2 + \omega_z^2)R_{AK_X}; \quad (1)$$

$$a'_y = a_y - (\omega_x^2 + \omega_z^2)R_{AK_Y}; \quad (2)$$

$$a'_z = a_z - (\omega_y^2 + \omega_x^2)R_{AK_Z}, \quad (3)$$

где $R_{AK_X} = R_{AK_Y} = R_{AK_Z} = R$ – расстояние от начала координат до акселерометров A_x, A_y, A_z соответственно; a'_x, a'_y, a'_z – значения выходных сигналов акселерометров A_x, A_y, A_z соответственно; a_x, a_y, a_z – проекции кажущихся ускорений на оси чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости вращения на оси связанной системы координат.

Учитывая расположение акселерометра A_0 (рис. 1), запишем:

$$a'_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(a_x + a_y + a_z) - (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)\frac{2}{3}R_{A_0}, \quad (4)$$

где a'_0 – значение выходного сигнала акселерометра A_0 ; R_{A_0} – расстояние от начала координат до точки установки A_0 .

На основании выражений (1) – (3) значения проекций a_x, a_y, a_z будут равны:

$$a_x = a'_x + (\omega_y^2 + \omega_z^2)R_{AK_X}; \quad (5)$$

$$a_y = a'_y + (\omega_x^2 + \omega_z^2)R_{AK_Y}; \quad (6)$$

$$a_z = a'_z + (\omega_y^2 + \omega_x^2)R_{AK_Z}. \quad (7)$$

Если предположить, что

$$R_{A_0} = \sqrt{3}R_{AK_X} = \sqrt{3}R_{AK_Y} = \sqrt{3}R_{AK_Z} = \sqrt{3}R,$$

то выражение (4) с учетом (5) – (7) принимает следующий вид:

$$a_0' = \frac{1}{\sqrt{3}}(a_x' + a_y' + a_z'). \quad (8)$$

На выходе акселерометров формируется сигнал в виде напряжения постоянного тока пропорционального проекции кажущегося ускорения на его ось чувствительности. На основании этого введем следующие обозначения: $U_{AK\delta}$, U_{AKy} , U_{AKz} , U_{AKo} – значения напряжений на выходах акселерометров A_x , A_y , A_z и A_0 , соответственно.

Так как используются однотипные акселерометры с одинаковым коэффициентом преобразования, то выражение (8) с учетом введенных обозначений примет следующий вид:

$$U_{AK0} = (U_{AKX} + U_{AKY} + U_{AKZ}) / \sqrt{3}. \quad (9)$$

Особенность выражения (9) заключается в том, что не имея информации об угловой скорости вращения связанной системы координат и кажущегося ускорения, а располагая только значениями напряжений на выходах акселерометров, можно решать задачу диагностирования технического состояния блока акселерометров с глубиной до вида отказов с последующим восстановлением измерений, обеспечивая тем самым активную отказоустойчивость блока акселерометров и соответственно всего БИНС.

3. Диагностирование технического состояния отказоустойчивого БА БИНС БПЛА

Разработанный БА относится к объектам диагностирования с неизвестным входом, то есть информацию о техническом состоянии акселерометров необходимо формировать на основании значений выходов акселерометров – выходных напряжений.

На основании равенства (9) формируем выражения для оценочных значений напряжений на выходе акселерометров:

$$\hat{U}_{AK0} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{AKX} + U_{AKY} + U_{AKZ}); \quad (10)$$

$$\hat{U}_{AKX} = \sqrt{3}U_{AK0} - (U_{AKY} + U_{AKZ}); \quad (11)$$

$$\hat{U}_{AKY} = \sqrt{3}U_{AK0} - (U_{AKX} + U_{AKZ}); \quad (12)$$

$$\hat{U}_{AKZ} = \sqrt{3}U_{AK0} - (U_{AKX} + U_{AKY}), \quad (13)$$

где \hat{U}_{AK0} , \hat{U}_{AKX} , \hat{U}_{AKY} и \hat{U}_{AKZ} – оценочные значения напряжений на выходах акселерометров A_0 , A_x , A_y и A_z соответственно.

Полученные равенства для оценочных значений напряжений на выходах акселерометров (10) – (13) позволяют решать первостепенную задачу диагностирования – контроль работоспособности блока акселерометров БИНС ЛА.

Структурно-функциональная схема системы контроля представлена на рис. 2.

Принцип действия системы заключается в следующем. С блока датчиков акселерометров поступает информация на блоки сравнения и формирования оценочных значений напряжений на выходах акселерометров. В блоке формирования оценочных значений на основании равенств (10) – (13) формируются оценки \hat{U}_{AK0} , \hat{U}_{AKX} , \hat{U}_{AKY} и \hat{U}_{AKZ} , которые сравниваются с действительными значениями напряжений $U_{AK\delta}$, U_{AKy} , U_{AKz} , U_{AKo} в блоке сравнения.

Блок сравнения формирует сигналы невязок:

$$\Delta_0 = U_{AK0} - \hat{U}_{AK0}; \quad (14)$$

$$\Delta_X = U_{AKX} - \hat{U}_{AKX}; \quad (15)$$

$$\Delta_Y = U_{AKY} - \hat{U}_{AKY}; \quad (16)$$

$$\Delta_Z = U_{AKZ} - \hat{U}_{AKZ}, \quad (17)$$

где Δ_0 , Δ_X , Δ_Y , Δ_Z – отклонение оценочных значений напряжений на выходах акселерометров A_0 , A_x , A_y и A_z , соответственно от их действительных значений.

Невязки, сформированные в блоке сравнения, поступают на блок формирования диагноза. В данном блоке техническое состояние БА определяется путем применения следующих предикатных уравнений:

$$\lambda_0 = s_2 \left\{ \left| U_{AK0} - \hat{U}_{AK0} \right| \leq \delta_0 \right\}_0^1; \quad (18)$$

$$\lambda_X = s_2 \left\{ \left| U_{AK_X} - \hat{U}_{AK_X} \right| \leq \delta_X \right\}_0^1; \quad (19)$$

$$\lambda_Y = s_2 \left\{ \left| U_{AK_Y} - \hat{U}_{AK_Y} \right| \leq \delta_Y \right\}_0^1; \quad (20)$$

$$\lambda_Z = s_2 \left\{ \left| U_{AK_Z} - \hat{U}_{AK_Z} \right| \leq \delta_Z \right\}_0^1, \quad (21)$$

где $\lambda_0, \lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z$ – двухзначные предикаты, описывающие процесс сравнения истинных и оценочных значений напряжений на выходах акселерометров; s_2 – символ двухзначного предикатного уравнения; $\delta_0, \delta_X, \delta_Y, \delta_Z$ – допустимые значения рассогласования сигналов.

Двухзначные предикаты (18)–(21) описывают про-

цесс сравнения невязок с допустимыми рассогласованиями. Если значение предиката равно «0», значит, рассогласование находится в допуске; если равно «1», то рассогласование находится не в допуске.

Полученные значения предикатных уравнений в виде логических «1» и «0» поступают на блок «Логика».

В этом блоке реализована ТЛ-модель [5], которая позволяет перейти от шкалы отношений, в терминах которой измеряются признаки (невязки) $\Delta_0, \Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$ в шкалу наименований, где используется булева переменная для описания признаков (табл. 1).

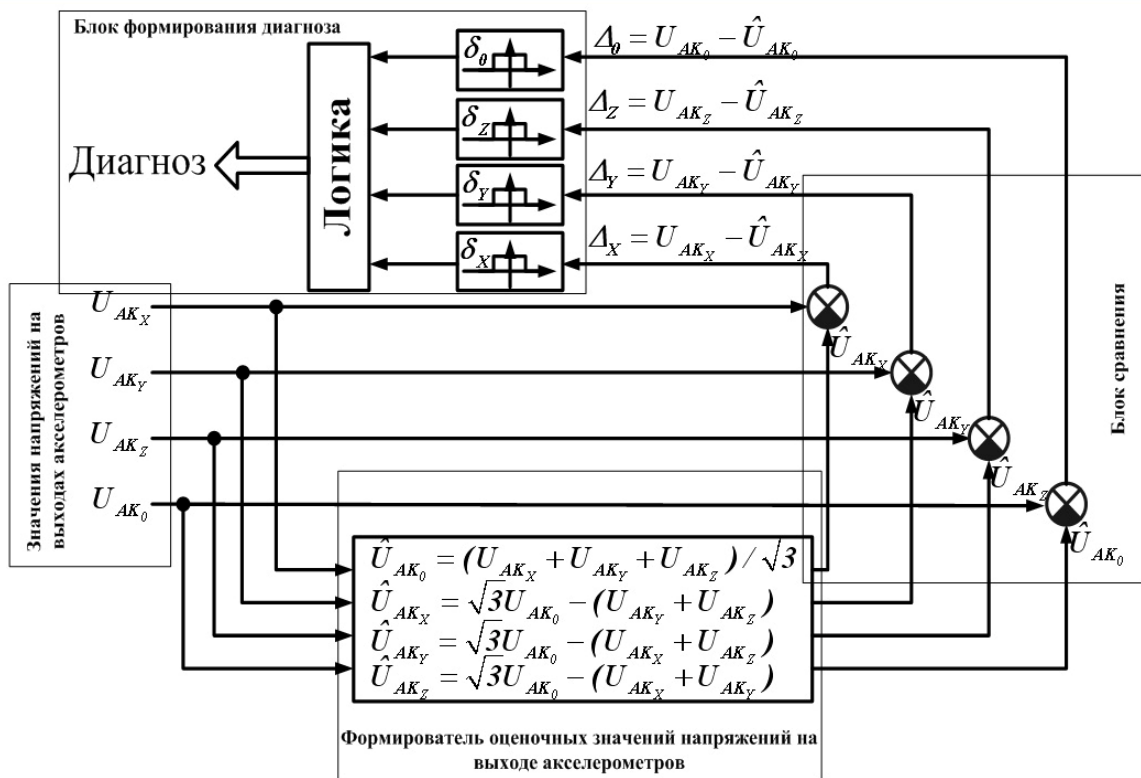


Рис. 2. Структурно-функциональная схема обнаружения отказа в блоке акселерометров БИНС ЛА

Анализ ТЛ-модели, которая в контексте решаемой задачи совпадает с TLR-моделью и TLK₀-моделью (табл. 1), показывает, что в таблице нет ни одной нулевой строки и строк с одинаковой структурой, следовательно, разработанная структура блока акселерометров БИНС БПЛА позволяет не только получать информацию о параметрах

движения летательного аппарата, но и различать отказавшие акселерометры, что обеспечивает, в рамках сигнально-параметрического подхода диагностирования, решение двух важных задач процесса диагностирования – обнаружение отказа в блоке и определение его места (определение отказавшего акселерометра).

Таблица 1

TL-модель для определения отказа в блоке акселерометров БИНС ЛА

Элементы множества мест отказов	Элементы множества косвенных признаков отказов Δ			
	Δ_0	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z
A_0	1	1	1	1
A_X	1	1	0	0
A_Y	1	0	1	0
A_Z	1	0	0	1

Полученная TLK₀-модель (табл. 1) отражает качественную связь места возникновения отказа с косвенными признаками $\Delta_0, \Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$ в терминах булевой переменной. Каждый косвенный признак делит все множество мест возникновения на два подмножества: в первое входят акселерометры, для которых косвенный признак равен одному, а во второе подмножество входят акселерометры, для которых косвенный признак равен нулю. Использование этого обстоятельства позволяет представить TLK₀-модель в форме дихотомического дерева, что позволяет перейти к решению важной задачи при построении диагностического обеспечения – построению правил поиска места отказов (ППМ) блока акселерометров БИНС ЛА. Решение этой задачи основано на получении безусловных ППМ БА (рис. 3).

Полученные ППМ (рис. 3) представляют собой фрагмент дихотомического дерева поиска места отказа, в узлах которого находятся двухзначные предикаты, значения которых определяем через доступные измерению характеристики блока акселерометров [5]:

$$z_1 = s_2 \{ |\Delta_0| \leq \delta_0 \} = \begin{cases} 1, \text{ есть отказ;} \\ 0, \text{ нет отказа;} \end{cases} \quad (22)$$

$$z_2 = s_2 \{ \text{sign}(\Delta_X) = \text{sign}(\Delta_Y) \} = \begin{cases} 1, \text{ отказ в } A_Z + A_0; \\ 0, \text{ отказ в } A_X + A_Y; \end{cases} \quad (23)$$

$$z_3 = s_2 \{ \text{sign}(\Delta_X) = \text{sign}(\Delta_0) \} = \begin{cases} 1, \text{ отказ в } A_Y; \\ 0, \text{ отказ в } A_X; \end{cases} \quad (24)$$

$$z_4 = s_2 \{ \text{sign}(\Delta_Z) = \text{sign}(\Delta_X) \} = \begin{cases} 1, \text{ отказ в } A_0; \\ 0, \text{ отказ в } A_Z. \end{cases} \quad (25)$$

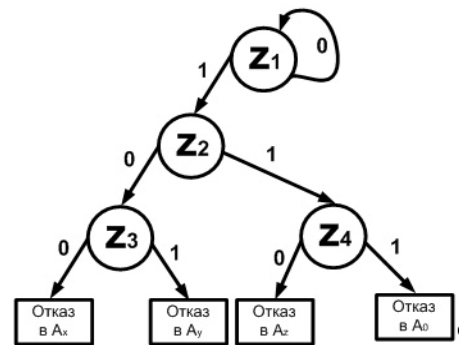


Рис. 3. Фрагмент дихотомического дерева обнаружения отказа и поиска его места возникновения в БА БИНС ЛА

Разработанное дихотомическое дерево (рис. 3) в рамках сигнально-параметрического подхода позволяет решать две наиболее важные задачи диагностирования технического состояния БА – установление факта возникновения отказа в БА и определения места его возникновения. Для снятия неопределенностей, связанных с классом и видом возникшего отказа, применяют функциональные диагностические модели, которые представляют особый класс математических моделей, которые связывают косвенные и прямые признаки отказов [5, 6].

Таким образом, разработанный БА БИНС БПЛА позволяет решать одну из наиболее важных задач обеспечения отказоустойчивости технических систем – диагностирование технического состояния с глубиной до вида отказа [6]. Экспериментальная отработка разработанного алгоритмического обеспечения отказоустойчивого БА БИНС БПЛА представлена на рис. 4, где в момент времени t_0 был введен отказ – дрейф акселерометра A_X . Параметры отказа (время возникновения, место, класс и вид) были определены с применением разработанного

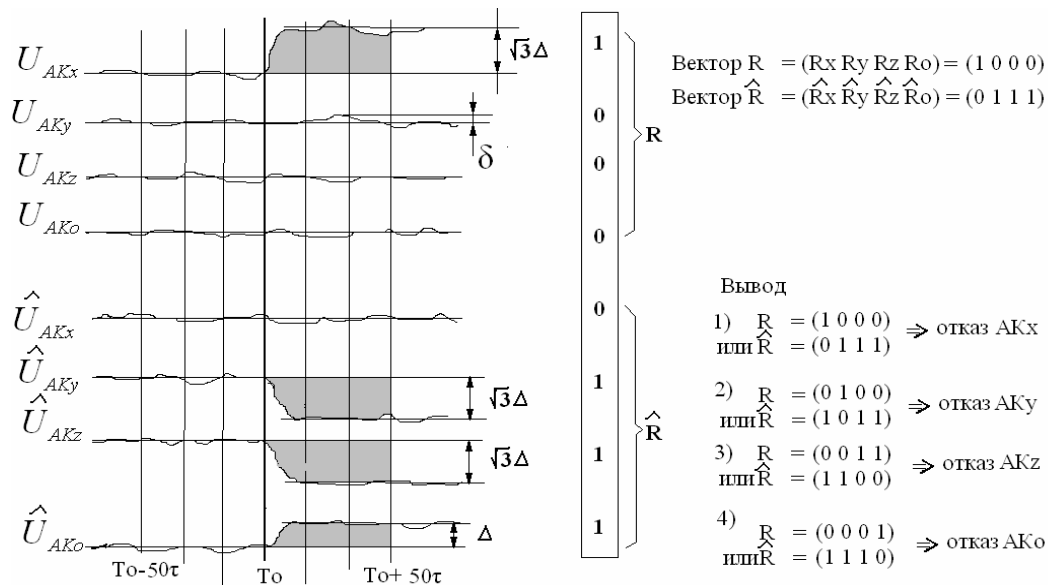


Рис. 4. Экспериментальное исследование алгоритмов диагностирования отказоустойчивого БА БИНС БПЛА алгоритмического обеспечения по истечению времени 50τ , где $\tau=0,001$ с (шаг квантования).

Заключение

Особенность разработанного БА БИНС БПЛА заключается в том, что такое размещение акселерометров позволяет снимать неопределенности, связанные с моментом возникновения отказа, местом его появления, классом и видом. Располагая информацией о состоянии БА, осуществим процесс гибкого восстановления измерений, что, в свою очередь, ведет к улучшению точности измеряемых параметров и повышению безопасности и качества полетов БПЛА.

Кроме того, такое размещение акселерометров обеспечивает выполнение всех требований функционирования блока, и по сравнению с другими вариантами обладает рядом преимуществ: отказоустойчивостью, малой массой и габаритами, малой потребляемой мощностью, менее сложной конструкцией и т.д.

Литература

1. Афонин А.А., Тювин А.В., Сулаков А.С. Анализ точности векторных гравиметрических измерений // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2007. – № 3. – С. 25-29.

2. Гаврилин Б.Н., Саакян А.А., Штек С.Г. Метод увеличения срока службы БИНС путем коррекции погрешностей каналов измерения первичной инерциальной информации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. – № 10. – С. 59-62.

3. Лобусов Е.С. Особенности функционирования и анализ точности бесплатформенной инерциальной навигационной системы в режиме начальной выставки // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. Приложение. – № 10. – С. 9-13.

4. Погорелов В.А. О помехоустойчивой оценке вектора состояния бесплатформенной навигационной системы летательного аппарата // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2005. – № 9. – С. 14-17.

5. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

6. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-тет, 2000. – Вып. 15. – С. 18-31.

Поступила в редакцию 25.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.