измерений на узлах учета рассчитанная при использовании Алгоритма, значительно меньше «неучтенного газа», рассчитанного по действующей Инструкции.

Выводы

Проанализирована проблема небаланса природного газа в системе «газоснабжающая организация – потребители». Выявлены недостатки действующей Инструкции, заключающиеся, в первую очередь, в отсутствии связи некоторых рассчитываемых потерь с реальным небалансом в системе «газоснабжающая организация – потребители» и неприменимостью на практике отдельных формул (1.3–1.4). Это требует разработки иного подхода к определению потерь при сведении баланса природного газа.

Предложена методика, позволяющая сводить баланс природного газа в системе «газоснабжающая организация – потребители» – «Алгоритм распределения небаланса природного газа», который содержит критерий устойчивого функционирования узлов учета газа и методику определения относительной погрешности узла учета в реальных условиях эксплуатации. Проверка выполнения критерия устойчивого функционирования позволяет исключить ситуацию, когда на потребителей относится величина небаланса больше, чем их абсолютная погрешность.

Разработан программный модуль «Распределение небаланса РН-1» для автоматизации процесса учета потерь и распределения небаланса природного, унификации отчетной документации об учетных количествах природного газа. Использование программного модуля позволяет автоматически перейти от результатов измерений к результатам учета для ИК с вычислителем.

Литература

1. Правила учета природного газа: постановление Совета Министров Респ. Беларусь № 1934, 15 дек. 2008 г. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. — 2008. — № 5/28964.
2. Инструкция о порядке определения норм потерь природного газа на объектах газораспределительной системы и узлах учета газа: постановление Национальной академии наук Беларуси и Министерства энергетики Респ. Беларусь № 5/7, 02 мар. 2009 // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь. — 2009. — № 80, 8/20641.
3. Методика выполнения измерений количества природного газа в Московской области измерительными комплексами на базе сужающих устройств с регистрацией результатов измерений на диаграммах самопишущих приборов и использования этих результатов при распределении небаланса между поставщиком и потребителями: рекомендация. — ГСОЕИ; МИ 2578-2003.

УДК 629.7

СТОХАСТИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ БИНС БЛА С ПАРАМЕТРАМИ РОДРИГА – ГАМИЛЬТОНА (КВАТЕРНИОНАМИ)

Ю.В. Гриднев, А.Н. Пальцев, Ю.Ф. Яцына

Рассматривается алгоритм и его техническая реализация в виде стохастической компьютерной модели в программе MATLAB-SIMULINK бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) с параметрами Родрига – Гамильтона (кватернионами). Схема блока ориентации в модели БИНС решает в кватернионах кинематическое уравнение связи земной и связанной систем координат беспилотного летательного аппарата (БЛА) с учетом шумов датчиков БИНС, а схема блока навигации определяет координаты местоположения БЛА и скорость его полета.

Преимущества применения малоразмерных БЛА для решения задач народного хозяйства, а также для специального назначения неоднократно обсуждались в отечественных и зарубежных технических источниках. Существование и дальнейшее развитие БЛА стало возможным благодаря ряду технических инновационных решений, связанных с разработкой робастных автопилотов, микросистемной авионики, бесплатформенных инерциально-навигационных систем (БИНС). Как отмечалось ранее [1], в БИНС реализуются алгоритмы ориентации с использованием различных кинематических параметров и алгоритмы навигации для определения координат местоположения БЛА. Точность БИНС на микрогироскопах и микроакселерометрах обратно пропорциональна времени полета БЛА, поэтому для повышения точности траекторного управления летательным аппаратом необходимы сложные алгоритмы формирования навигационных параметров и их коррекция на основе информации от спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС.

Недостатками ранее рассмотренных алгоритмов БИНС с углами Эйлера – Крылова и уравнениями Пуассона являются нелинейность преобразования пространственной ориентации БЛА в связанной и географической системах координат по всем трем углам и неспособность решать задачу ориентации при угле тангажа в 90°. Наиболее удобными для БИНС являются параметры Родрига – Гамильтона (кватернионы), которых четыре в отличие от трех углов Эйлера – Крылова и кинематические уравнения с кватернионами линейны и интегрируемы при любых углах курса, тангажа и крена.

В компьютерных моделях БИНС с углами Эйлера – Крылова взаимное положение связанной системы координат БЛА $OXYZ$ и географической системы координат $OX_gY_gZ_g$ определяется тремя углами Эйлера – Крылова и девятью направляющими косинусами, которые в БИНС в кватернионах можно заменить с помощью четырех параметров Родрига – Гамильтона.

Известная матрица направляющих косинусов $A = A_\gamma A_\upsilon A_\psi$ при переходе от системы координат $OX_gY_gZ_g$ к системе координат $OXYZ$ учитывает взаимный поворот осей на углы курса ψ, тангажа υ и крена γ согласно выражению

$$A = \begin{Vmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi & \\ 0 & 1 & 0 & - \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi & \end{Vmatrix} \times \begin{Vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} \times \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & 1 \end{Vmatrix} =$$

$$= \begin{Vmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\theta & -\sin\psi\cos\theta \\ -\cos\psi\sin\theta\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \cos\theta\cos\gamma & \sin\psi\sin\theta\cos\gamma + \cos\psi\sin\gamma \\ -\cos\psi\sin\theta\sin\gamma + \sin\psi\cos\gamma & -\cos\theta\sin\gamma & -\sin\psi\sin\theta\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma \end{Vmatrix}. \quad (1)$$

Каждому повороту осей БЛА на угол φ относительно исходной системы координат ставят в соответствие четыре числа — четыре параметра Родрига – Гамильтона, которые связаны друг с другом соотношением

$$\lambda_0^2 + \lambda_2^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1, \quad (2)$$

где $\lambda_0\lambda_1\lambda_2\lambda_3$ — параметры Родрига – Гамельтона.

Матрицу направляющих косинусов (1) с учетом выражения (2) можно представить в параметрах Родрига – Гамильтона в виде

$$A = \begin{pmatrix} 2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1 & 2\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3 & 2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2 \\ 2\lambda_1\lambda_2 - 2\lambda_0\lambda_3 & 2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1 & 2\lambda_2\lambda_3 + 2\lambda_0\lambda_1 \\ 2\lambda_1\lambda_3 + 2\lambda_0\lambda_2 & 2\lambda_2\lambda_3 + 2\lambda_0\lambda_1 & 2\lambda_0^2 + 2\lambda_3^2 - 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для удобства и систематизации вычислений, связанных с нахождением параметров Родрига – Гамильтона и сложением конечных поворотов БЛА, применяют кватернионы – гиперкомплексные числа:

$$\Lambda = \lambda_0 + \vec{i}\,\lambda_1 + \vec{j}\lambda_2 + \vec{k}\lambda_3, \quad (4)$$

элементами которых являются параметры Родрига – Гамильтона $\lambda_n (n = 1, 2, 3)$ с одной действительной λ_0 и тремя мнимыми единицами i, j, k (i, j, k — трехгранник мнимых связаных осей БЛА).

Кватернионы впервые были введены в математику в 1843г. В.Р. Гамильтоном при разработке нового аппарата гиперкомплексных чисел. Величины λ_0 и $i\lambda_1 + j\lambda_2 + k\lambda_3$ называются соответственно скалярной и векторной частями кватерниона. Кватернион можно рассматривать как вектор в четырехмерном пространстве, длина которого является тензором или модулем кватерниона:

$$|\Lambda| = \sqrt{\lambda_0^2 + \lambda_2^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}. \quad (5)$$

Основные свойства кватернионов приведены в работах [4, 5], откуда собственным кватернионом называется кватернион (2), компонентами которого являются параметры Родрига – Гамильтона.

Определим результирующий кватернион, характеризующий взаимное расположение трех осей географической системы координат а $OX_gY_gZ_g$ и трех осей связанной системы $OXYZ$. Первый поворот оси связанной системы координат $OXYZ$ происходит вокруг оси OY_g против часовой стрелки на угол ψ, что приводит к формированию только двух параметров (из четырех параметров Родрига – Гамильтона) и позволяет записать первый собственный кватернион:

$$\psi \to P = \cos\frac{\psi}{2} + \vec{j}\sin\frac{\psi}{2}. \quad (6)$$

Аналогично могут быть получены кватернионы, характеризующие повороты на углы υ и γ:

$$\upsilon \to Q = \cos\frac{\upsilon}{2} + k\sin\frac{\upsilon}{2},$$

$$\gamma \to R = \cos\frac{\gamma}{2} + i\sin\frac{\gamma}{2}. \qquad (7)$$

Результирующий кватернион перехода от географической системы координат $OX_gY_gZ_g$ к подвижной системе БЛА $OXYZ$ определяется произведением

$$\Lambda = P \times Q \times R, \qquad (8)$$

которое после подстановки P (6), Q и R (7) можно представить четырьмя параметрами Родрига – Гамильтона:

$$\lambda_0 = \cos\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\gamma}{2} - \sin\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\gamma}{2};$$

$$\lambda_1 = \cos\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\gamma}{2} + \sin\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\gamma}{2};$$

$$\lambda_2 = \sin\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\gamma}{2} + \cos\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\gamma}{2};$$

$$\lambda_3 = \cos\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\gamma}{2} - \sin\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\gamma}{2}. \qquad (9)$$

Ранее было показано [1], что для определения матрицы пересчета координат из связанной системы в географическую систему с учетом вращения БЛА использовалось векторное уравнение абсолютной линейной скорости точки:

$$\dot{\vec{D}} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \frac{d\vec{D}_1}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{D}. \qquad (10)$$

Заменим его кватернионным аналогом. Векторное произведение $\vec{\omega} \times \vec{D}$ в пространстве кватернионов имеет вид $\frac{1}{2}(\Omega \times R - R \times \Omega)$, что позволяет выражение (10) записать в виде:

$$V = \frac{d\tilde{R}}{dt} + \frac{1}{2}(\Omega \times R - R \times \Omega), \qquad (11)$$

где V, Ω, R — гиперкомплексные отображения вектора абсолютной линейной скорости $\dot{\vec{D}}$ вектора угловой скорости ω и вектора $\vec{D}$. Учитывая переход от неподвижной системы координат к подвижной с помощью кватерниона Λ (8) и преобразования компонент вектора $\vec{D}'$ из системы координат $OXYZ$ в компоненты вектора в системе $OX_gY_gZ_g$ за счет обратного равенства перепроектирования, получим искомое уравнение (11) для кватернионов:

$$R = \Lambda \times R' \times \bar{\Lambda}, \qquad (12)$$

где $\bar{\Lambda}$ — сопряженный кватернион.

Продифференцировав обе части последнего равенства по времени и умножив полученное выражение слева на $\bar{\Lambda}$, а справа на Λ, можно записать

$$\bar{\Lambda} \times \dot{R} \times \Lambda = \bar{\Lambda} \times \dot{\Lambda} \times R' \times \bar{\Lambda} \times \Lambda + \bar{\Lambda} \times \Lambda \times$$

$$\times \dot{R}' \times \bar{\Lambda} \times \Lambda + \times \bar{\Lambda} \times \Lambda \times R' \times \dot{\bar{\Lambda}} \times \Lambda. \qquad (13)$$

Учитывая свойство нормированных кватернионов $\bar{\Lambda} \times \Lambda = \Lambda \times \bar{\Lambda} = 1$, выражение (13) преобразуется к виду

$$\bar{\Lambda} \times \dot{R} \times \Lambda = \dot{R}' + \bar{\Lambda} \times \dot{\Lambda} \times R' + R' \times \dot{\bar{\Lambda}} \times \Lambda. \qquad (14)$$

В полученном выражении (14) величина $\bar{\Lambda} \times \dot{R} \times \Lambda$ есть абсолютная линейная скорость V БЛА согласно (11), правые части которого и выражение (14) равны между собой. Приравнивая вторые слагаемые в правых частях уравнений (14) и (11), получим

$$\bar{\Lambda} \times \dot{\Lambda} = \frac{1}{2}\Omega, \; 2\dot{\Lambda} = \Lambda \times \Omega. \qquad (15)$$

Равенство (15) и есть искомое кинематическое уравнение (11) для кватернионов. Прировняв третьи слагаемые в уравнениях (11) и (14), получим дифференциальное уравнение относительно сопряженного кватерниона:

$$2\dot{\bar{\Lambda}} = -\Omega \times \bar{\Lambda}. \qquad (16)$$

Уравнение (16), представленное в матричной форме, имеет следующий вид:

$$2\begin{Vmatrix} \dot{\lambda}_0 \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \\ \dot{\lambda}_3 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \lambda_0 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 \\ \lambda_1 & \lambda_0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_0 & -\lambda \\ \lambda_3 & -\lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Vmatrix}. \qquad (17)$$

Полученное выражение по проекциям ω_x, ω_y, ω_z вектора абсолютной угловой скорости $\vec{\omega}$ на оси подвижной системы координат позволяет найти параметры Родрига – Гамильтона, характеризующие положения подвижной системы координат $OXYZ$ относительно неподвижной $OX_gY_gZ_g$.

При построении модели БИНС в кватернионах необходимо ввести кватернионы K и M. Кватернион K используется для преобразований инерционного трехгранника $O_ИX_ИY_ИZ_И$ к географическому трехграннику $OX_gY_gZ_g$, а кватернион M используется для перехода от трехгранника $O_ИX_ИY_ИZ_И$ к связанному трехграннику $OXYZ$ и определяется произведением

$$M = K \times \Lambda. \qquad (18)$$

Кватернион Λ характеризует преобразование географического трехгранника в связанный и является аналогом матрицы направляющих косинусов A. Зная кватернион Λ, можно пересчитать кажущееся ускорение БЛА, измеренное в связанных с БЛА осях, в географическую систему координат и определить параметры ориентации φ, θ, γ.

Рассмотрим компьютерную модель вычисления кватерниона Λ. Преобразуем выражение (18) путем умножения левой и правой части равенства на сопряженный кватернион $\bar{K}$:

$$\Lambda = \bar{K} \times M. \qquad (19)$$

Дифференцируя правую и левую части (19) по времени, получаем уравнение вида

$$\dot{\Lambda} = \dot{\bar{K}} \times M + \bar{K} \times \dot{M}. \qquad (20)$$

Согласно выражению (16), можно записать $2\dot{\bar{K}} = -\Omega_g \times \bar{\Lambda}$, согласно выражению (15), получим $2\dot{M} = M \times \Omega$, тогда выражение (20) перепишем в виде

$$\dot{\Lambda} = -\frac{1}{2}\Omega_g \times \underline{\bar{K} \times M} + \frac{1}{2}\bar{K} \times M \times \Omega, \qquad (21)$$

и с учетом $\Lambda = \bar{K} \times M$ окончательно получим обобщенное уравнение Пуассона в кватернионах:

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \times \Omega - \Omega_g \times \Lambda, \qquad (22)$$

где Ω, Ω_g — гиперкомплексные отображения векторов абсолютной угловой скорости связанной и географической систем координат.

Уравнение (22) позволяет создать блок компьютерной модели для вычисления кватерниона Λ. При численном решении уравнения (22) возникают вычислительные погрешности, связанные с нарушением равенства $\bar{\Lambda} \times \Lambda = 1$ (уход нормы кватерниона), поэтому необходимо решать уравнения с коррекцией нормы кватерниона:

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \times \Omega - \Omega_g \times \Lambda + \Lambda \times (1 - \Lambda^2), \qquad (22)$$

где $\Lambda^2 = \lambda_0^2 + \lambda_2^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ — норма кватерниона;

Общая структурная схема БИНС в кватернионах показана на рис. 1, а ее компьютерная модель в программе MATLAB-SIMULINK представлена на рис. 2.

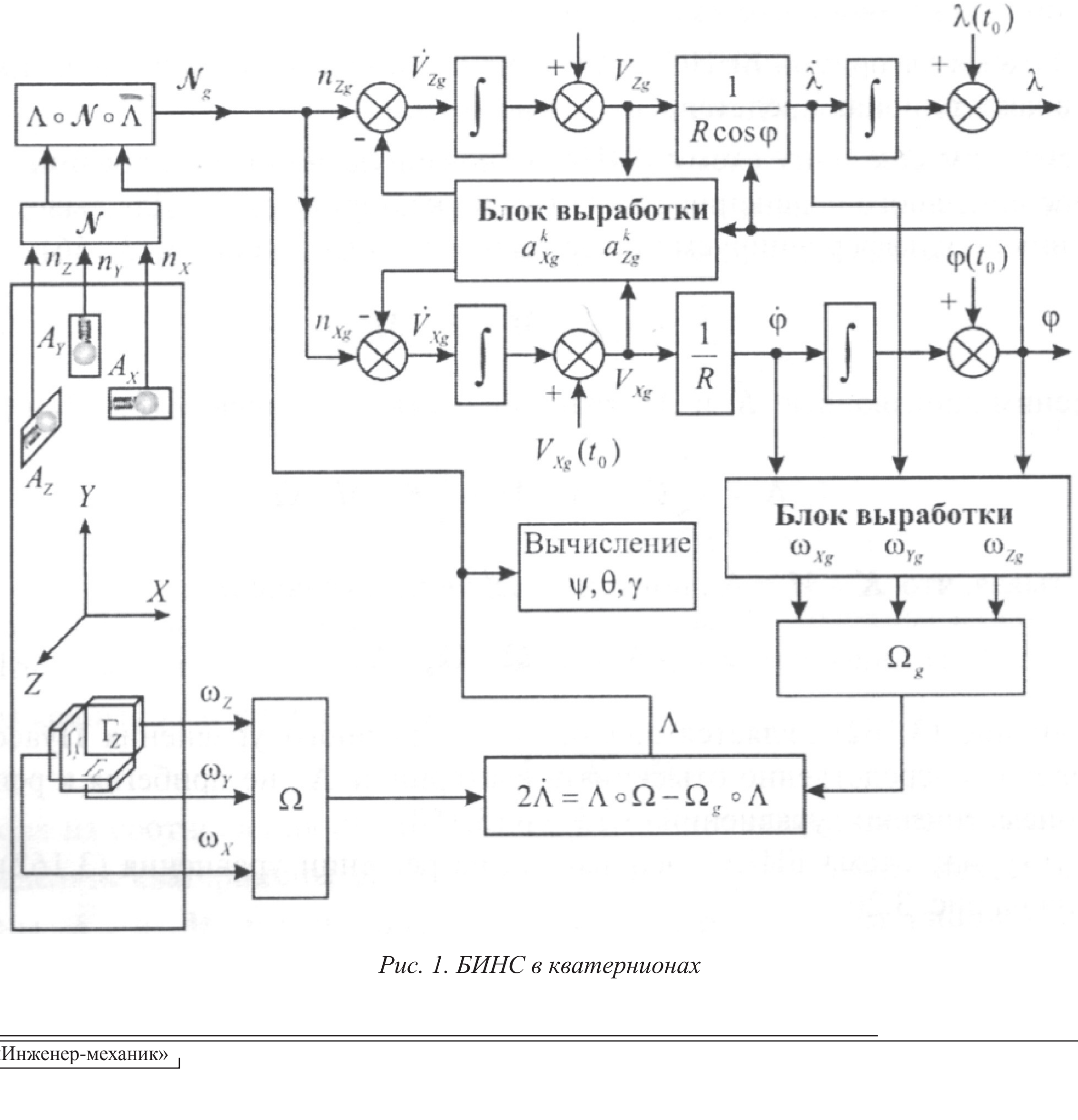

Рис. 1. БИНС в кватернионах

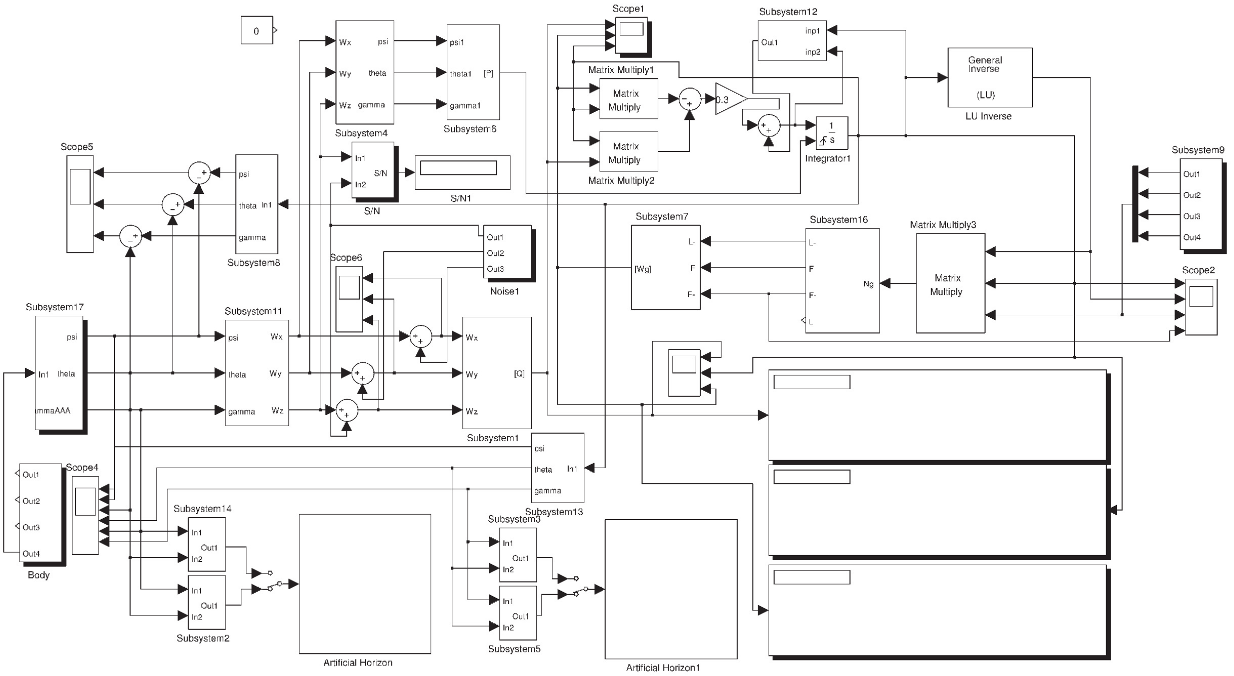

Рис. 2. Компьютерная модель

В данной модели так же, как и в БИНС с углами Эйлера – Крылова и с уравнением Пуассона (блоке пространственной ориентации), первичными источниками информации об углах Эйлера – Крылова являются ДУСы, на выходах которых должны быть угловые скорости связанной системы координат БЛА $\omega_x \omega_y \omega_z$. Для моделирования угловых скоростей используются последовательно включенные блоки «Subsystem 17» и «Subsystem 11». Истинные углы Эйлера – Крылова генерируются тремя подблоками «Sine Wave Function» с различными амплитудами и частотами, которые входят в состав «Subsystem 17» или в состав блока «Body». Блок «Body» представляет собой модель планера БЛА с соответствующими силами и моментами, на вход которой воздействуют силы по осям $F_x F_y F_z$ и моменты $M_x M_y M_z$. На выходах «Subsystem 17» формируются углы Эйлера – Крылова, положение БЛА в инерциальной системе координат и скорости полета. Для компьютерной модели БИНС с выходов блока «Body» используются только необходимые углы Эйлера – Крылова. Полученные углы ψ, θ, γ с выходов«Subsystem 17» подаются в «Subsystem 11» и на два осциллографа «Scope 4» и «Scope 5». В блоке «Subsystem 11» углы Эйлера – Крылова трансформируются в угловые скорости $\omega_x \omega_y \omega_z$, из которых формируется матрица размером 4×4 и собирается вектор $\vec{\omega}$

$$\vec{\omega} = [\Omega] = \left\| \begin{array}{c|ccc} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \hline \omega_x & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ \omega_z & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{array} \right\|. \qquad (23)$$

В итоге на выходе «Subsystem 6» образуется кватернион Λ в виде [*P*], который используется в интеграторе с внешним приемом начальных условий, т. е. матрицей $\Lambda(t_0)$.

В блоке компьютерной модели, реализующем вычисление кватерниона Λ, используются два субблока перемножения (MatrixMultiply1 и MatrixMultiply2), схема разности, интегратор (Integrator1) и субблок коррекции «Subsystem12». Вычисление кватерниона Λ происходит путем интегрирования уравнения (22), точность решения которого определяется шумами датчиков угловых скоростей за счет расчета Ω в блоке ориентации и шумами датчиков линейных ускорений за счет определения Ω_g в блоке навигации. Такая схема модели по точности определения угловых ошибок пространственной ориентации положения БЛА соответствует схемам БИНС с углами Эйлера – Крылова и уравнением Пуассона. Повысить точность измерения углов пространственного положения БЛА можно за счет формирования кватерниона Λ в правой части уравнения (22) по углам Эйлера – Крылова согласно выражению (9).

Для этой цели в модель введены последовательно соединенные субблоки «Subsystem4» и «Subsystem6», на выходе которых формируется кватернион Λ для использования в множительных устройствах «MatrixMultiply1» и «MatrixMultiply2». Анализ угловых ошибок работы блока ориентации с помощью «Scope5» показал, что точность работы БИНС с отдельной схемой формирования кватерниона Λ увеличивается в 5–8 раз.

Кватернион Λ характеризует в блоке ориентации прямое преобразование географической системы координат в связанную систему, а в алгоритмах блока навигации осуществляется обратный пересчет (преобразование) гиперкомплексного отображения N_g вектора кажущегося ускорения n_g в соответствии с равенством перепроектирования:

$$N_g = \Lambda \times N \times \overline{\Lambda}, \qquad (24)$$

где N_g, N — отображения вектора кажущегося ускорения, заданного в географической и в связанной системах координат.

В схеме БИНС с кватернионами блок навигации функционирует аналогично блокам в схемах БИНС с углами Эйлера – Крылова и уравнением Пуассона [1].

При исследовании точностных характеристик компьютерной модели БИНС учитывались модели шумов датчиков угловых скоростей, датчиков линейных ускорений и погрешности задания начальных условий. Шум, содержащийся в выходных сигналах ДЛУ и ДУС, определяет их разрешающую способность. Предельное измерение в основном определяется уровнем шума, который включает внешний фоновый шум и шум датчика. Если на выходе датчика включить фильтр нижних частот, то путем уменьшения полосы пропускания фильтра при сохранении спектра полезного сигнала можно снизить уровень шума. В компьютерной модели шум ДУС по трем угловым скоростям генерируется в субблоке «Noise1», в котором можно изменять его ширину спектра и мощность. Сформированный такой шум аддитивно добавляется в каждый из трех каналов формирования угловых скоростей связанной системы координат БЛА. Данные схемы формирования шумов ДУС применялись для БИНС с углами Эйлера – Крылова и с уравнением Пуассона [1]. Для количественной оценки точностных характеристик блока ориентации трех БИНС были определены ошибки измерения угловых скоростей ω_x, ω_y, ω_z при различных отношениях $\frac{S}{n} = \frac{\text{сигнал}}{\text{шум}}$ ($\frac{s}{n} = 1{,}0$ и $\frac{s}{n} = 10$) и различных значениях амплитуды сигнала $S = 1$ и $S = 10$. Результаты измерения ошибок угловых скоростей для трех моделей БИНС с углами Эйлера – Крылова, с уравнением Пуассона и в кватернионах представлены в табл. 1. На рис. 3, 4 показаны в качестве примеров осциллограммы угловых скоростей и их ошибок.

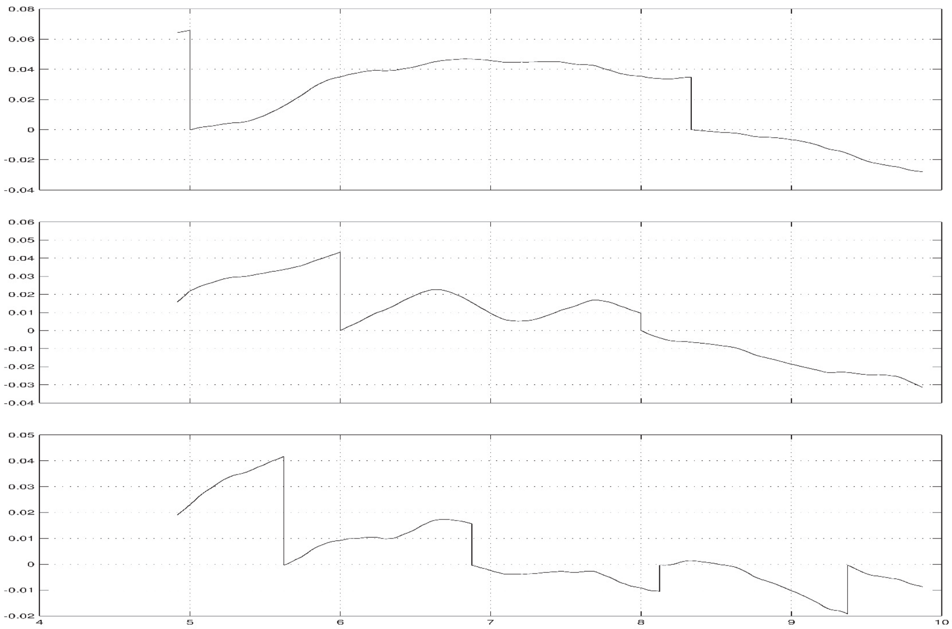

Рис. 3 Угловые ошибки ДУСов при S/N = 10 и S = 1

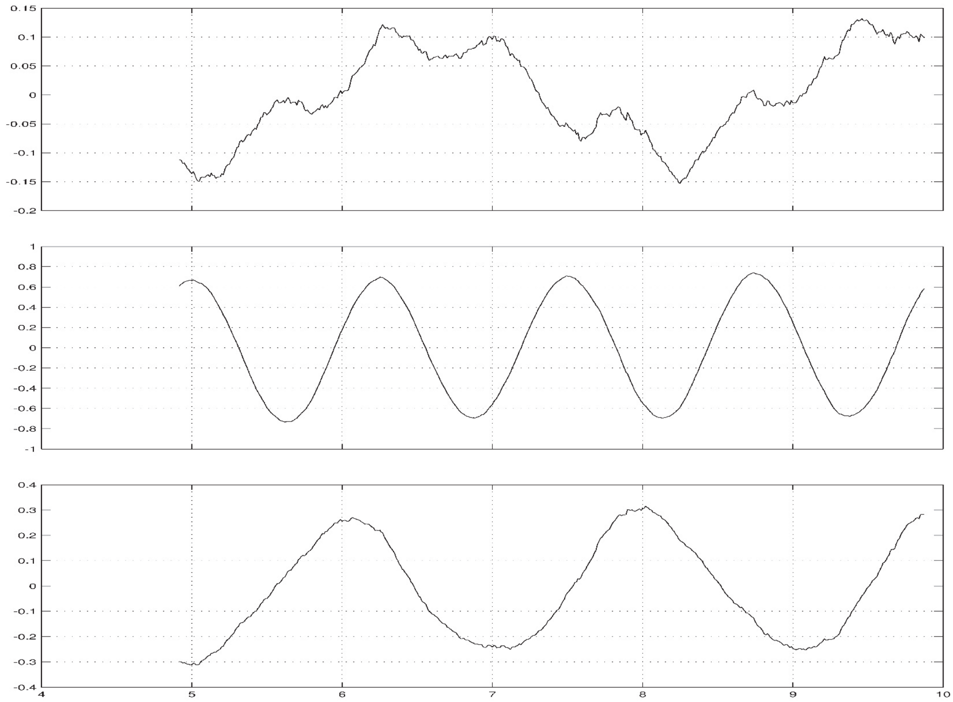

Рис. 4. Угловые скорости ДУСов при S/N = 10 и S = 1

Табл. 1

БИНС с углами Эйлера – Крылова, с уравнением Пуассона и в кватернионах

	БИНС (aru*) с углами Эйлера – Крылова		БИНС (aru_2_) с уравнениями Пуассона		БИНС в кватернионах	
Без шума	$S = 1$	$S = 10$	$S = 1$	$S = 10$	$S = 1$	$S = 10$
ω_x	±0,15	±5	+0,13/–0,12	±5	0,14/–0,12	±5
ω_y	±0,75	±7	±0,7	±7	±0,7	±7
ω_z	±0,25	+4/–4,2	±0,3	+4,4/–3	±0,3	+4,3/–3
$\Delta\psi$	$\pm1{,}5\cdot10^{-3}$	±2	$\pm1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	$-1{,}5\cdot10^{-3}$	±3
$\Delta\theta$	$\pm1{,}5\cdot10^{-3}$	±1	$-0{,}9\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$\pm4\cdot10^{-2}$	±0,5
$\Delta\gamma$	$\pm2\cdot10^{-3}$	±1,5	$-4\cdot10^{-4}$	$-2\cdot10^{-4}$	$\pm2{,}3\cdot10^{-3}$	±2
S/N = 1,0 (отношение сигнал/шум)						
ω_x при $s/n = 1{,}0$	+1,15/–0,24	±5	0,15/–0,2	±5	0,25/–0,4	+5/–6
ω_y при $s/n = 1{,}6$	±0,75	±7	0,7/–0,8	±7	±1	±6
ω_z при $s/n = 2{,}67$	+0,3/–0,4	±4	0,3/–0,4	+4/–3	±0,4	+4/–3
$\Delta\psi$	–0,12/–0,4	±3	0,23/0	±0,2	±0,13	±3
$\Delta\theta$	–0,1/–0,3	±1	0,17/0	0,2/-0,1	±0,2	±0,5
$\Delta\gamma$	–0,1/–0,25	±1,5	0,1	±0,75	0,2/–0,6	±1,3
S/N = 10 (отношение сигнал/шум)						
ω_x при $s/n = 1{,}0$	0,13/–0,15	±5	0,13/–0,15	±5	0,2/–0,2	5/–6
ω_y при $s/n = 1{,}6$	±0,75	±7	±7,5	±6	±0,6	±6
ω_z при $s/n = 2{,}67$	0,25/–0,25	4,5/–3,5	0,3/–0,28	+3/–4	0,2/–0,22	4/–3
$\Delta\psi$	–0,03/–0,1	±3	0,06/–0,03	±0,055	±0,05	±3
$\Delta\theta$	–0,06/–0,11	±0,75	±0,04	–0,01	±0,07	±0,5
$\Delta\gamma$	0,05/–0,1	±1,5	±0,02	0,23	0,05/–0,2	±1,5

Сигналы датчиков ДУС и ДЛУ моделей БИНС формировались по оценкам их реальных характеристик, полученных в процессе полетов БЛА «Бусел». В качестве примера на рис. 5 показаны сигнал линейного ускорения ДЛУ и его спектры для различных участков времени полета БЛА

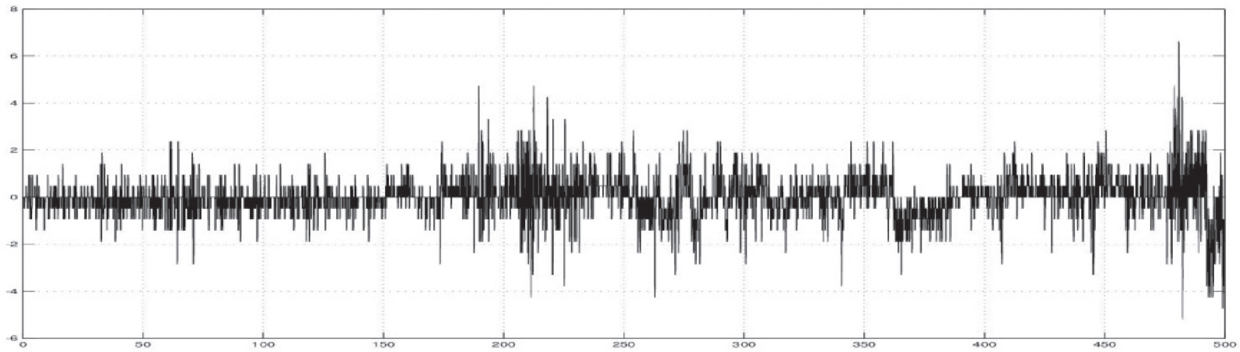

Рис. 5, а. Параметр линейного ускорения по оси Y (A_y) при прямолинейном полете БЛА

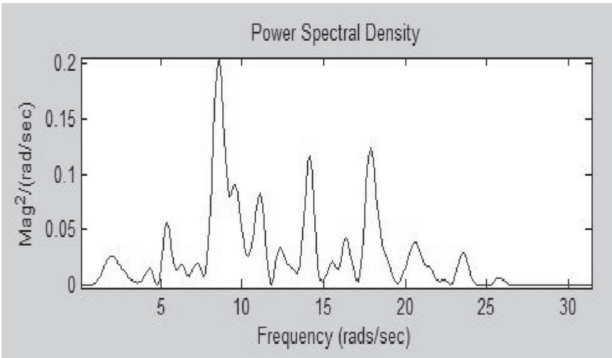

Рис. 5, б. Энергетический спектр A_y на интервале 180–190 с полета БЛА

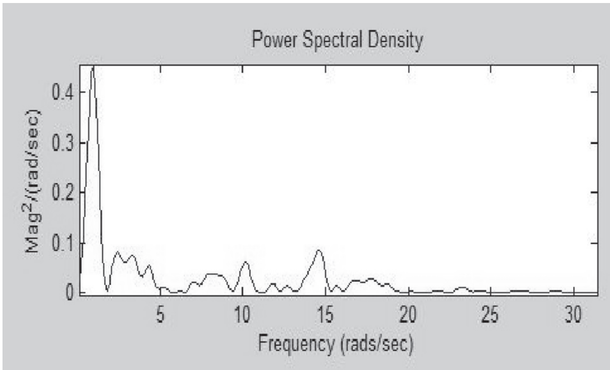

Рис. 5, в. Энергетический спектр A_y на интервале 290–300 с полета БЛА

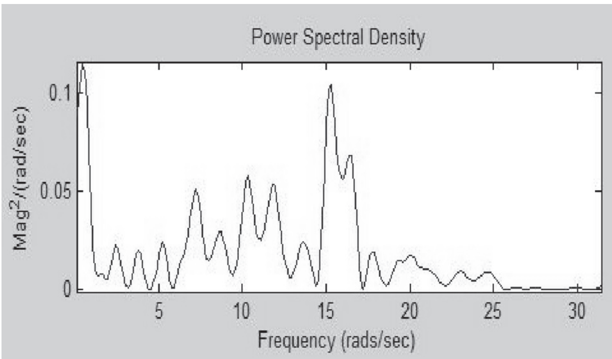

Рис. 5, г. Энергетический спектр A_y на интервале 340–350 с полета БЛА

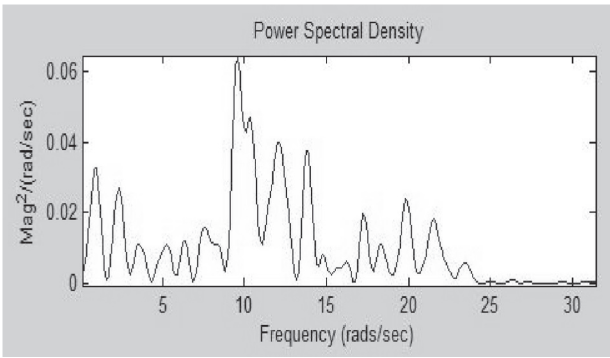

Рис. 5, д. Энергетический спектр A_y на интервале 410–420 с полета БЛА

Анализ полученных результатов, представленных в табл. 1, показывает следующее.

1. Увеличение амплитуды сигналов датчиков S для всех моделей БИНС приводит к пропорциональному увеличению амплитуды угловых скоростей.

2. Точность работы модели БИНС с уравнениями Пуассона выше, чем у БИНС с углами Эйлера – Крылова и в кватернионах.

3. Закономерности изменения амплитуд угловых скоростей и их ошибок измерения сохраняются для всех моделей БИНС с углами Эйлера – Крылова, с уравнением Пуассона и с кватернионами.

4. Угловые ошибки всех моделей БИНС с увеличением отношения $\frac{S}{n} = \frac{\text{сигнал}}{\text{шум}}$ уменьшаются.

Литература.

1. Инженер-механик: республиканский межотраслевой производственно-практический журнал БОИМ. — № 2 [51], апрель–июнь 2011 г. — С. 17–30.
2. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика / В.Я. Распопов. — Тула, 2010. — 247 с.: ил.
3. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. — С.-Пб., 2009. — 278 с.: ил.
4. Бранец, В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыгловский. — М., 1973. — 320 с.: ил.
5. Лурье, А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. — М., 1961. — 824 с: ил.

УДК 629.7.018.7

ИСПЫТАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

О.М. Василенко, А.Г. Иванов, М.В. Максимова
«ФТИ НАН Беларуси», лаборатория МфСиБАК

Вновь разрабатываемые образцы беспилотных авиационных комплексов (далее — БАК), в состав которых входят беспилотные летательные аппараты (далее — БЛА), подвергают на разных стадиях их разработки испытаниям, целью которых является принятие решения о целесообразности продолжения разработки или начале их массового производства (рис. 1).

Испытания образцов БАК (БЛА) производится по программам испытаний, которая определяет цель, объем и порядок проведения, а также условия всех работ, связанных с всесторонней оценкой испытываемого образца БАК (БЛА) и определением его характеристик. Программа испытаний разрабатывается на основе тактико-технического задания (далее — ТТЗ) или технического задания (далее — ТЗ), конструкторской и программной документации в соответствии с положениями типовых программ и методик испытаний (при их наличии) и техническими нормативными правовыми актами в области технического нормирования и стандартизации, касающихся вопросов организации и проведения испытаний [1]. Программа испытаний состоит из следующих основных разделов: