

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-03

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Е. В. Страшнов^а, И. Н. Мироненко^б*Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru^б mironenko_in@mail.ru

Аннотация: в работе рассматривается задача имитационного моделирования инерциальных и магнитных датчиков в системах виртуального окружения. Для решения этой задачи представлены математические модели расчета показаний акселерометра, гироскопа и магнитометра с учетом их реальных параметров, влияния температуры, перекрестных связей и наличия шумов. Предлагается подход, в котором показания датчиков используются для вычисления углов Эйлера, задающих ориентацию объекта. При реализации разработанного подхода была задействована калибровка показаний акселерометра и гироскопа для уменьшения влияния ошибки дрейфа нуля. Вычисление углов Эйлера проводилось путем интегрирования значений гироскопа, а также на основе полученных соотношений относительно данных акселерометра и магнитометра. При этом для ликвидации накопления ошибки интегрирования вследствие наличия шумов датчиков был реализован комплементарный фильтр, в котором вычисленные углы смешиваются в заданной пропорции. Апробация предлагаемых методов и подходов была проведена в созданном нами комплексе виртуального окружения на примере моделирования движения виртуальных моделей квадрокоптера и вертолета соосной схемы. Результаты апробации показали адекватность предлагаемых в статье решений и их применимость при реализации современных видеотренажеров, предназначенных для обучения операторов навыкам управления беспилотными летательными аппаратами.

Ключевые слова: имитационное моделирование, инерциальный датчик, углы Эйлера, калибровка, комплементарный фильтр, беспилотный летательный аппарат, система виртуального окружения.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

Для цитирования: Страшнов Е. В., Мироненко И. Н. Имитационное моделирование инерциальных датчиков в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):24–33. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-03.

*Поступила в редакцию: 24.01.2024.**В окончательном варианте: 28.02.2024.*

SIMULATION OF INERTIAL SENSORS IN VIRTUAL ENVIRONMENTS

E. V. Strashnov^а, I. N. Mironenko^б*Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru^б mironenko_in@mail.ru

Abstract: this study deals with the simulation of inertial and magnetic sensors in virtual environment systems. We proposed a mathematical model for the correction of accelerometer, gyroscope, and magnetometer readings to account for the effects of temperature, cross-coupling, and noise. We also proposed using the sensor readings to compute the Euler angles that define the vehicle’s orientation. We calibrated the accelerometer and gyroscope readings to reduce the zero drift error. The Euler angles were derived by integrating the gyroscope readings and using the found relationships between the accelerometer and magnetometer readings. To eliminate the cumulative integration error caused by sensor noise, we implemented a complementary filter. It mixes the angles in a given ratio. We tested these approaches in a virtual environment with a virtual quadcopter and a coaxial-rotor helicopter. The results were promising and can be used in advanced simulators designed to train UAV operators.

Keywords: simulation, inertial sensor, Euler angles, calibration, complementary filter, unmanned aerial vehicle, virtual environment system.

Acknowledgements: this study is supported by the government contract No. FNEF-2024-0002 Simulation of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environment Systems granted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences.

Cite this article: Strashnov E. V., Mironenko I. N. Simulation of Inertial Sensors in Virtual Environments. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):24–33. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-03.

Original article submitted: 24.01.2024.

Revision submitted: 28.02.2024.

Введение

В последние годы с развитием электроники широкое распространение получили микроэлектромеханические (МЭМС) инерциальные и магнитные датчики — устройства, позволяющие определить изменение положения тела в пространстве путем измерения его ускорения и угловой скорости, а также характеристик магнитного поля. Особенность таких датчиков заключается в том, что они являются миниатюрными и располагаются на общей кремниевой подложке микросхемы [1]. Их применение охватывает широкий спектр областей, включая авиацию, промышленность, транспорт, робототехнику, виртуальную реальность и т. д. Современные мобильные телефоны, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), устройства трекинга уже невозможно представить без таких датчиков. В области виртуальной реальности активно применяются устройства, такие как гарнитура [2], контроллеры и трекары, позволяющие повысить уровень погружения человека в виртуальное пространство. На мобильные телефоны устанавливаются приложения, которые отслеживают повседневный график передвижения человека [3], включая также ситуации, когда он находится внутри помещения [4], где недоступен GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования). В свою очередь, управление беспилотными транспортными средствами основано на реализации обратной связи по показаниям таких датчиков [5].

Для обучения операторов навыкам управления БПЛА в настоящее время активно создаются системы виртуального окружения и имитационно-тренажерные комплексы, в которых вместо реальных объектов используются их виртуальные аналоги. Такие системы позволяют уменьшить риск поломки реальных устройств и отработать различные нештатные ситуации, которые могут возникнуть при управлении БПЛА. При этом качество обучения в таких тренажерах непосредственно зависит от адекватности методов и алгоритмов моделирования динамики и управления БПЛА. Имитационное моделирование инерциальных датчиков в тренажерах имеет важное значение, поскольку оно позволяет повысить уровень тренировки и уменьшить вероятность возникновения ложных навыков при управлении БПЛА.

Основная проблема МЭМС датчиков заключается в том, что их измерения являются неточными из-за наличия перекрестных связей в показаниях, дрейфа нуля и шумов [6]. Кроме того, интегрирование показаний датчиков приводит к накоплению ошибок и отдалению от истинных значений. Для решения этой проблемы распространенным подходом является применение различных фильтров [7, 8] и калибровка датчиков [9, 10] перед началом работы с устройством. В данной работе представлены методы и подходы расчета показаний инерциальных и магнитных виртуальных датчиков (акселерометр, гироскоп и магнитометр) с учетом их реальных параметров, влияния температуры, перекрестных связей и наличия шумов. Предлагается подход, в рамках которого показания этих датчиков применяются для вычисления углов Эйлера ориентации виртуальных объектов. При этом обработка данных реализована с калибровкой показаний датчиков, интегрированием угловых скоростей гироскопа и применением комплементарного фильтра. Адекватность предлагаемых в статье решений была апробирована в системе виртуального окружения VirSim [11] на примере управления движением виртуальных моделей БПЛА.

Математические модели датчиков

В статье рассматриваются инерциальные датчики — акселерометр и гироскоп, а также магнитометр. Эти датчики выполняют измерения в своих локальных системах координат (ЛСК). Для определенности оси таких ЛСК будем обозначать через x , y и z . Каждый датчик характеризуется диапазоном и разрешением измерений. На показания датчиков влияет дрейф нуля, шумы и перекос осей.

Дрейф является постоянным или случайным смещением нулевого значения и в общем случае зависит от температуры окружающей среды, а также от других факторов (например, ускорение объекта и вибрации). Далее среди случайных смещений показаний мы будем рассматривать только температурное, так как остальными факторами на малом промежутке времени моделирования можно пренебречь. Шум в показаниях датчиков хорошо описывается нормальным распределением с нулевым средним, которое задается с помощью дисперсии. Также датчики подвержены перекосам осей, которые приводят к перекрестным связям в их показаниях. Рассмотрим математические модели расчета показаний этих датчиков.

Акселерометр измеряет проекцию кажущегося ускорения (разность между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением) вдоль осей своей системы координат. В общем случае акселерометр не находится в центре масс объекта. Поэтому идеальные показания акселерометра без учета ошибок вычисляются следующим образом [12]:

$$\tilde{a}' = a_l + \omega_l \times (\omega_l \times d) + \dot{\omega}_l \times d - R^T a_g, \quad (1)$$

где a_l и ω_l — линейное ускорение и угловая скорость объекта в его ЛСК; d — вектор, соединяющий центр масс объекта с центром акселерометра; R — матрица перехода из ЛСК объекта в мировую систему координат (МСК); $a_g = (0, 0, -g)^T$, g — ускорение свободного падения.

Без ограничения общности будем считать, что для виртуального акселерометра его положение совпадает с центром масс объекта. Тогда будет верно, что $d \equiv 0$, а соотношение (1) преобразуется к виду:

$$\tilde{a}' = a_l - R^T a_g. \quad (2)$$

При наличии ошибок в измерениях ускорение (2) корректируется следующим образом:

$$\tilde{a} = S_a (C_a \tilde{a}' + a_{b0} + (T - T_n) a_{bT} + \eta_a), \quad (3)$$

где $C_a = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_y & \alpha_z \\ \alpha_x & 1 & \alpha_z \\ \alpha_x & \alpha_y & 1 \end{pmatrix}$ — матрица перекоса осей, α_i — коэффициенты перекрестных связей осей, a_{b0} — постоянное смещение в показаниях, a_{bT} — температурное смещение, T и T_n — текущая и номинальная температура среды, $\eta_{a,i} \sim N(0, \sigma_{a,i}^2)$ — аддитивный Гауссовский шум, $\sigma_{a,i}^2$ — дисперсия шума вдоль осей, $S_a = \text{diag} \{s_{a,i}\}$ — диагональная матрица коэффициентов, $s_{a,i} = 1 + (T - T_n) s_{T,i}^a$, $s_{T,i}^a$ — температурные коэффициенты масштабирования, $i \in \{x, y, z\}$.

Так как у акселерометра есть диапазон и разрешение в измерениях, то на выходе датчика получим ускорение $a = (a_x, a_y, a_z)^T$, которое вычисляется как:

$$a = r_a * \text{round} \left(\frac{\tilde{a}_{lim}}{r_a} \right), \quad a_{lim,i} = \begin{cases} a_{\max,i}, & \tilde{a}_i > a_{\max,i} \\ -a_{\max,i}, & \tilde{a}_i < -a_{\max,i} \\ \tilde{a}_i, & \text{в прот. случае} \end{cases}, \quad i \in \{x, y, z\}, \quad (4)$$

где $a_{\max,i}$ — максимальное ускорение, которое измеряет акселерометр; r_a — разрешение акселерометра.

Гирисконп измеряет угловую скорость вращения объекта вдоль осей своей системы координат. Математическая модель гироскопа описывается как:

$$\tilde{\omega} = S_\omega (C_\omega \omega_l + \omega_{b0} + (T - T_n) \omega_{bT} + \eta_\omega), \quad (5)$$

где $C_\omega = \begin{pmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ \beta_x & 1 & \beta_z \\ \beta_x & \beta_y & 1 \end{pmatrix}$ — матрица перекоса осей, β_i — коэффициенты перекрестных связей осей,

ω_{b0} — постоянное смещение в показаниях, ω_{bT} — температурное смещение, $\eta_{\omega,i} \sim N(0, \sigma_{\omega,i}^2)$ — аддитивный Гауссовский шум, $\sigma_{\omega,i}^2$ — дисперсия шума, $S_\omega = \text{diag} \{s_{\omega,i}\}$ — диагональная матрица коэффициентов $s_{\omega,i} = 1 + (T - T_n) s_{T,i}^\omega$, $s_{T,i}^\omega$ — температурные коэффициенты масштабирования, $i \in \{x, y, z\}$.

Так как у гироскопа также есть диапазон и разрешение измерений, то на его выходе угловая скорость $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ вычисляется в виде:

$$\omega = r_\omega * \text{round} \left(\frac{\tilde{\omega}_{lim}}{r_\omega} \right), \quad \tilde{\omega}_{lim,i} = \begin{cases} \omega_{\max,i}, \tilde{\omega}_i > \omega_{\max,i} \\ -\omega_{\max,i}, \tilde{\omega}_i < -\omega_{\max,i} \\ \tilde{\omega}_i, \text{ в прот. случае} \end{cases}, \quad i \in \{x, y, z\}, \quad (6)$$

где $\omega_{\max,i}$ — максимальная угловая скорость, которую измеряет гироскоп; r_ω — разрешение гироскопа.

Магнитометр измеряет характеристики магнитного поля Земли. В частности, индукционный магнитометр вычисляет вектор индукции магнитного поля вдоль осей своей системы координат. В общем случае на его показания влияют металлические предметы, которые находятся в непосредственной близости с датчиком. Математическая модель магнитометра задается как:

$$\tilde{m} = S_m (C_m m_l + m_{b0} + (T - T_n) m_{bT} + \eta_m), \quad (7)$$

где m_l — вектор магнитной индукции в ЛСК датчика, $C_m = \begin{pmatrix} 1 & \gamma_y & \gamma_z \\ \gamma_x & 1 & \gamma_z \\ \gamma_x & \gamma_y & 1 \end{pmatrix}$ — матрица перекоса

осей, γ_i — коэффициенты перекрестных связей осей, m_{b0} — постоянное смещение в показаниях, m_{bT} — температурное смещение, $\eta_{m,i} \sim N(0, \sigma_{m,i}^2)$ — аддитивный Гауссовский шум, $\sigma_{m,i}^2$ — дисперсия шума вдоль осей, $S_m = \text{diag} \{s_{m,i}\}$ — диагональная матрица коэффициентов $s_{m,i} = 1 + (T - T_n) s_{T,i}^m$, $s_{T,i}^m$ — температурные коэффициенты масштабирования, $i \in \{x, y, z\}$.

Так как магнитометр имеет свой диапазон и разрешение измерений, то на его выходе получим вектор магнитной индукции $m = (m_x, m_y, m_z)^T$, который вычисляется как:

$$m = r_m * \text{round} \left(\frac{\tilde{m}_{lim}}{r_m} \right), \quad \tilde{m}_{lim,i} = \begin{cases} m_{\max,i}, \tilde{m}_i > m_{\max,i} \\ -m_{\max,i}, \tilde{m}_i < -m_{\max,i} \\ \tilde{m}_i, \text{ в прот. случае} \end{cases}, \quad i \in \{x, y, z\}, \quad (8)$$

где $m_{\max,i}$ — максимальное значение показаний магнитометра; r_m — разрешение магнитометра.

Соотношения (2)–(8) представляют собой математические модели расчета показаний акселерометра, гироскопа и магнитометра. Далее рассмотрим практическую задачу, в которой показания датчиков применяются для вычисления углов ориентации объекта.

Вычисление углов ориентации объекта на основе показаний датчиков

Рассмотрим две системы координат: неподвижная МСК $OXYZ$ и ЛСК $Cxyz$, жестко связанная с подвижным объектом. При этом точка C является центром масс объекта. В качестве допущения будем считать, что направления осей ЛСК объекта совпадают с направлениями осей виртуальных датчиков. Пусть ориентация объекта в пространстве задается с помощью углов Эйлера с последовательностью ZYX , которая означает, что сначала выполняется поворот вокруг оси Z на угол ψ , затем вокруг оси Y на угол θ и, наконец, вокруг оси X на угол ϕ . Тогда матрица перехода R из ЛСК $Cxyz$ в МСК $OXYZ$ примет вид:

$$R = \begin{pmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\theta + c_\psi s_\theta c_\phi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\phi & -c_\psi s_\theta + s_\psi s_\theta c_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где используются обозначения $c_\alpha = \cos \alpha$, $s_\alpha = \sin \alpha$, $\alpha \in \{\phi, \theta, \psi\}$.

Связь между угловой скоростью объекта и углами Эйлера задается с помощью кинематических уравнений Эйлера [13, с. 122]:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega_x + \omega_y \sin \phi \tan \theta + \omega_z \cos \phi \tan \theta; \\ \dot{\theta} &= \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi; \\ \dot{\psi} &= \omega_y \sin \phi / \cos \theta + \omega_z \cos \phi / \cos \theta, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\theta \neq \pm\pi/2$.

Покажем, как с помощью показаний акселерометра, гироскопа и магнитометра вычислить углы Эйлера, которые задают ориентацию объекта. Перед использованием этих показаний необходимо

выполнить калибровку для заранее известного состояния объекта. Нами рассматривается подход, в котором калибровка датчиков проводится вначале, когда объект неподвижен и углы Эйлера известны (например, $\phi = \theta = \psi = 0$). Тогда, согласно формуле (2), в идеальном случае акселерометр должен выдавать ускорение $\tilde{a}' = (0, 0, g)^T$, а гироскоп — нулевую угловую скорость $\tilde{\omega}' = (0, 0, 0)^T$. Суть калибровки акселерометра и гироскопа состоит в расчете векторов $\Delta\tilde{a}$ и $\Delta\tilde{\omega}$ отклонений показаний датчиков от истинных значений. Для этого рассматриваются выборки из N значений показаний датчиков, по среднему арифметическому которых вычисляются искомые векторы:

$$\Delta\tilde{a} = \sum_{k=1}^N a^{(k)}/N - \tilde{a}', \quad \Delta\tilde{\omega} = \sum_{k=1}^N \omega^{(k)}/N. \quad (11)$$

Тогда показания акселерометра и гироскопа в процессе моделирования корректируются следующим образом:

$$\hat{a} = g \frac{a - \Delta\tilde{a}}{\|a - \Delta\tilde{a}\|}, \quad \hat{\omega} = \omega - \Delta\tilde{\omega}. \quad (12)$$

Калибровка магнитометра в данной статье не рассматривается, так как она предполагает предварительное выполнение вращений объекта вокруг своих осей с целью обнаружения магнитных полей, создаваемых ферромагнетиками [3, с. 17].

Откалиброванные показания гироскопа (12) используются для вычисления углов Эйлера путем интегрирования уравнений (10) по явной схеме:

$$\begin{aligned} \phi_g &= \phi(t) + \Delta t (\hat{\omega}_x(t) + \hat{\omega}_y(t) \sin \phi(t) \tan \theta(t) + \hat{\omega}_z(t) \cos \phi(t) \tan \theta(t)); \\ \theta_g &= \theta(t) + \Delta t (\hat{\omega}_y(t) \cos \phi(t) - \hat{\omega}_z(t) \sin \phi(t)); \\ \psi_g &= \psi(t) + \Delta t (\hat{\omega}_y(t) \sin \phi(t) / \cos \theta(t) + \hat{\omega}_z(t) \cos \phi(t) / \cos \theta(t)), \end{aligned} \quad (13)$$

где Δt — шаг моделирования; $\phi(0) = \phi_0$, $\theta(0) = \theta_0$, $\psi(0) = \psi_0$ (в частности, $\phi_0 = \theta_0 = \psi_0 = 0$).

Однако из-за шумов в показаниях гироскопа с течением времени будет накапливаться ошибка интегрирования, которая приведет к сильному различию с истинными значениями. Для уменьшения влияния этой ошибки необходимо корректировать углы Эйлера, вычисленные по формуле (13). Для этой цели используются показания акселерометра и магнитометра.

Основная идея использования акселерометра заключается в том, что в отсутствии ускорения объекта его показания в МСК должны быть равны гравитационному ускорению, то есть $\hat{a}^w = R\hat{a} = (0, 0, g)^T$. Если умножить $\hat{a}^w$ на матрицу R^T с учетом (9), то получим следующие уравнения:

$$\hat{a}_x = -g \sin \theta; \quad \hat{a}_y = g \sin \phi \cos \theta; \quad \hat{a}_z = g \cos \phi \cos \theta.$$

Отсюда также верно, что $\sqrt{\hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2} = g |\cos \theta|$.

Тогда углы Эйлера при $|\theta| < \pi/2$ вычисляются следующим образом:

$$\phi_a = \arctan \frac{\hat{a}_y}{\hat{a}_z}, \quad \theta_a = \arctan \frac{-\hat{a}_x}{\text{sgn } \hat{a}_z \sqrt{\hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2}}. \quad (14)$$

Уравнения (14) позволяют вычислить только углы ϕ и θ . Для вычисления недостающего угла ψ используются показания магнитометра. Идея заключается в том, что вектор магнитной индукции Земли должен оставаться неизменным в МСК, то есть $m^w = Rm = (m_x^w, m_y^w, m_z^w)^T$, где $m_x^w = \text{const} \neq 0$, $m_y^w = \text{const} \neq 0$ и $m_z^w = \text{const}$. Тогда, если умножить вектор m^w на матрицу R^T из (9), то получим соотношения в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_x &= c_\theta(c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w) - s_\theta m_z^w; \\ m_y &= c_\phi(-s_\psi m_x^w + c_\psi m_y^w) + s_\theta s_\phi(c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w) + c_\theta s_\phi m_z^w; \\ m_z &= s_\phi(s_\psi m_x^w - c_\psi m_y^w) + s_\theta c_\phi(c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w) + c_\theta c_\phi m_z^w. \end{aligned}$$

Преобразуем эти уравнения следующим образом. Умножим третье уравнение на s_ϕ и вычтем из второго уравнения, умноженного на c_ϕ , а также умножим первое уравнение на c_θ , второе — на $s_\theta s_\phi$, третье — на $s_\theta c_\phi$ и суммируем полученный результат. В итоге получим:

$$m_z s_\phi - m_y c_\phi = s_\psi m_x^w - c_\psi m_y^w = \sqrt{(m_x^w)^2 + (m_y^w)^2} \sin(\psi - \delta);$$

$$m_x c_\theta + m_y s_\theta s_\phi + m_z s_\theta c_\phi = c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w = \sqrt{(m_x^w)^2 + (m_y^w)^2} \cos(\psi - \delta),$$

где угол $\delta = \arctan(m_y^w/m_x^w)$ определяется в начале моделирования.

Отсюда будет верно, что:

$$\psi_m = \arctan \frac{m_z s_\phi - m_y c_\phi}{m_x c_\theta + m_y s_\theta s_\phi + m_z s_\theta c_\phi} + \delta. \quad (15)$$

В итоге мы получили соотношения (13)–(15), позволяющие вычислить углы Эйлера на основе показаний гироскопа, акселерометра и магнитометра. Для применения полученных результатов воспользуемся комплементарными фильтрами, которые смешивают показания датчиков в заданной пропорции:

$$\begin{aligned} \phi(t + \Delta t) &= (1 - w)\phi_g + w\phi_a; \\ \theta(t + \Delta t) &= (1 - w)\theta_g + w\theta_a; \\ \psi(t + \Delta t) &= (1 - w)\psi_g + w\psi_m, \end{aligned} \quad (16)$$

где w — весовой коэффициент.

Идея комплементарного фильтра (16) заключается в том, что, выбирая небольшие значения весового коэффициента w , можно скорректировать результаты, полученные путем интегрирования угловых скоростей по формуле (13). При этом ускорение объекта и ошибки в показаниях магнитометра из-за наличия ферромагнетиков не будут сильно отклонять углы Эйлера от истинных значений. В дальнейшем вычисленные углы Эйлера используются для управления и стабилизации БПЛА в системе виртуального окружения.

Результаты моделирования

Предложенные в статье методы и подходы имитационного моделирования инерциальных датчиков были реализованы в комплексе виртуального окружения VirSim [11]. В рамках этого комплекса виртуальные модели сцен и роботов создаются в системе компьютерного моделирования 3ds Max из набора геометрических примитивов и других объектов. Созданные виртуальные модели экспортируются в специальном формате для последующего чтения данных в VirSim перед началом моделирования. Кроме того, был разработан редактор для создания функциональных схем, которые описывают логику управления объектами и состоят из набора блоков, соединенных друг с другом линиями. Программный комплекс VirSim состоит из трех подсистем: динамики, управления и визуализации. Цикл моделирования в этом комплексе следующий. Сначала в подсистеме управления выполняется расчет функциональных схем с передачей полученного результата в другие подсистемы. Затем в подсистеме динамики вычисляются новые координаты объектов на основе их математических моделей. Эти координаты передаются в подсистему визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены в масштабе реального времени. Обратная связь в VirSim реализована посредством передачи данных из подсистемы динамики в подсистему управления.

Для реализации инерциальных датчиков в системе 3ds Max был разработан плагин с целью их создания, задания параметров и экспортирования в VirSim. На рис. 1 показан пример создания акселерометра для виртуальной модели квадрокоптера. Для этого необходимо выбрать датчик на панели инструментов, задать для него параметры и привязать к общему узлу в модели квадрокоптера. Математические модели (2)–(8) расчета показаний виртуальных датчиков были реализованы в подсистеме динамики в виде программных модулей. При этом глобальные параметры сцены, такие как температура окружающей среды и вектор индукции магнитного поля, задаются в текстовом конфигурационном файле, чтение которого выполняется перед началом моделирования.

Вычисление углов Эйлера на основе показаний датчиков было реализовано в подсистеме управления. На рис. 2 показан фрагмент функциональной схемы управления виртуальной моделью БПЛА. В

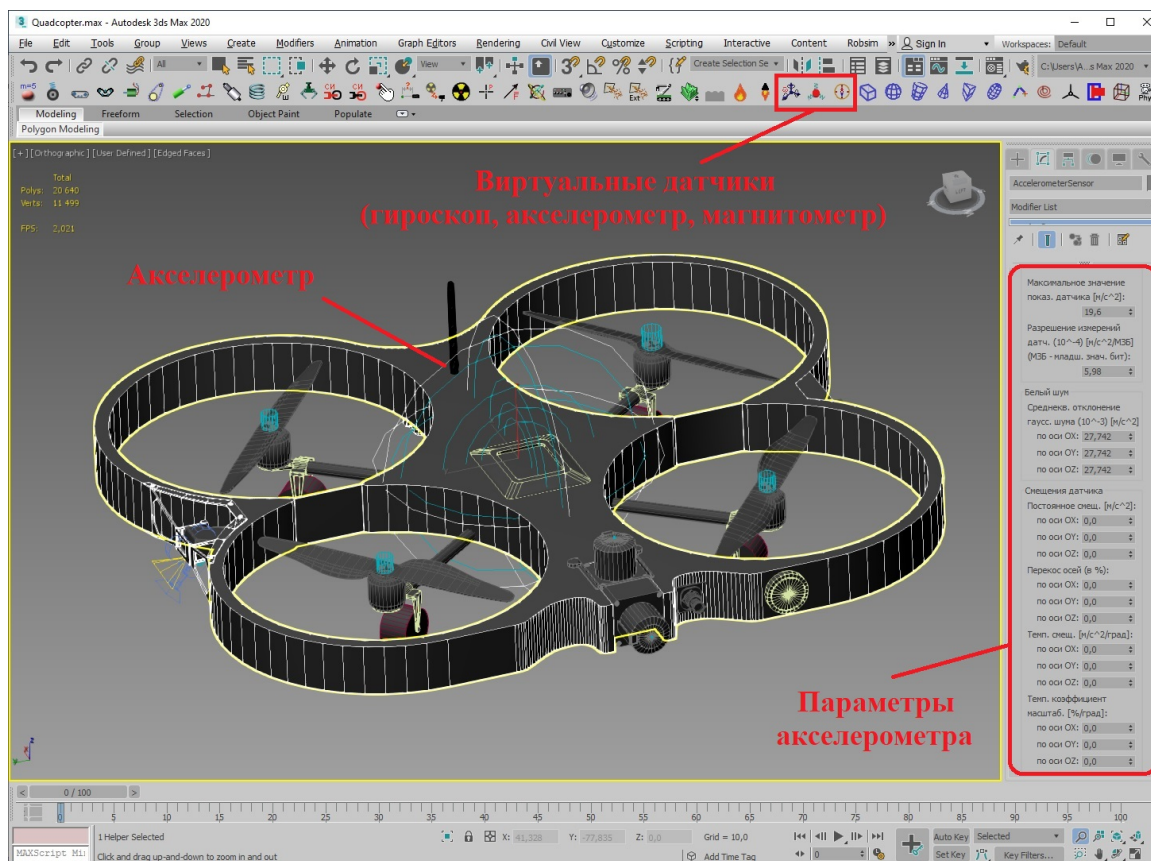


Рис. 1. Создание инерциальных датчиков в системе 3ds Max

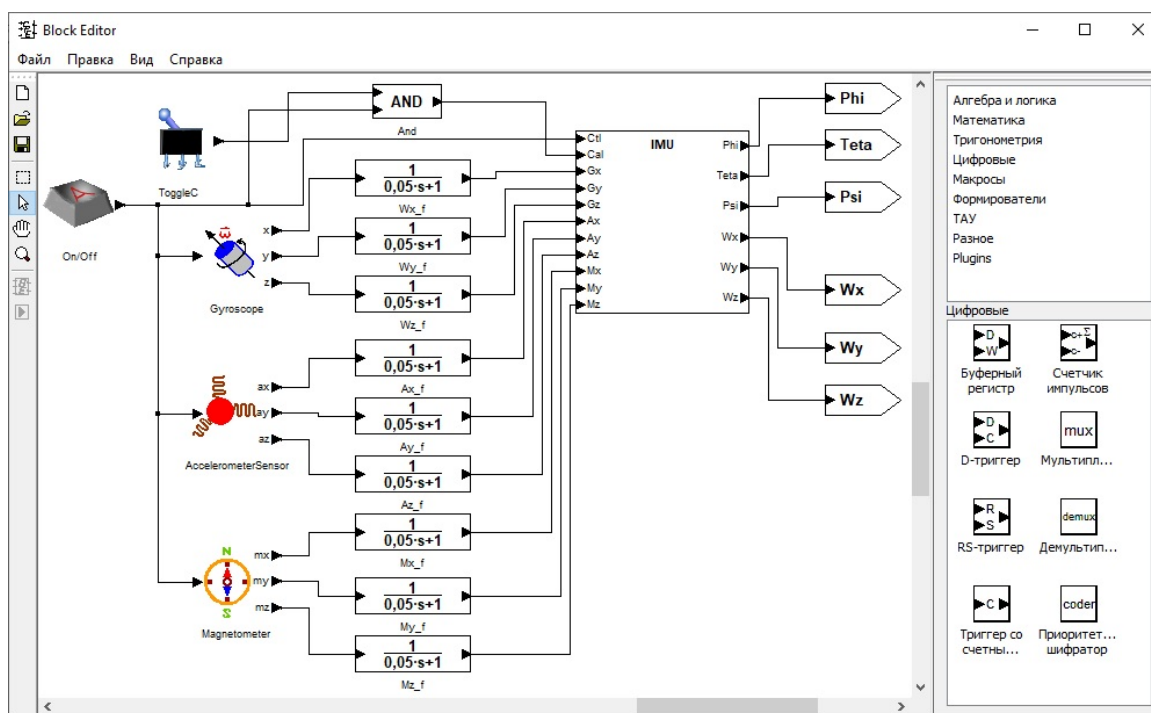


Рис. 2. Функциональная схема управления

ней входами являются управляющие сигналы пульта (кнопка включения и тумблер запуска калибровки). При этом инерциальные датчики реализованы в виде блоков, которые вычисляют свои значения, если поступает единичный сигнал от пульта на их входы. Для уменьшения влияния шумов в показаниях датчиков в схеме были добавлены фильтры нижних частот первого порядка с постоянной времени

$\tau = 0.05$ с. Отфильтрованные значения датчиков поступают на входы разработанного плагин-блока с именем IMU (Inertial Measurement Unit), который вычисляет углы Эйлера, согласно соотношениям (11)–(16) с весовым коэффициентом $w = 0.02$. Вычисленные углы в функциональной схеме затем используются для управления горизонтальным движением и стабилизации БПЛА.

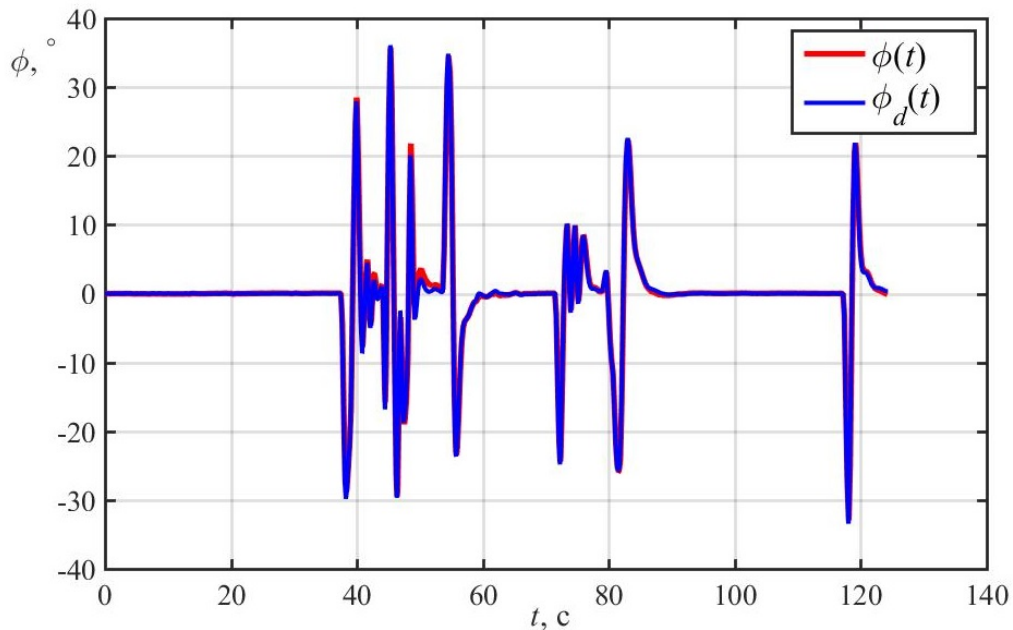


Рис. 3. График изменения угла тангажа БПЛА

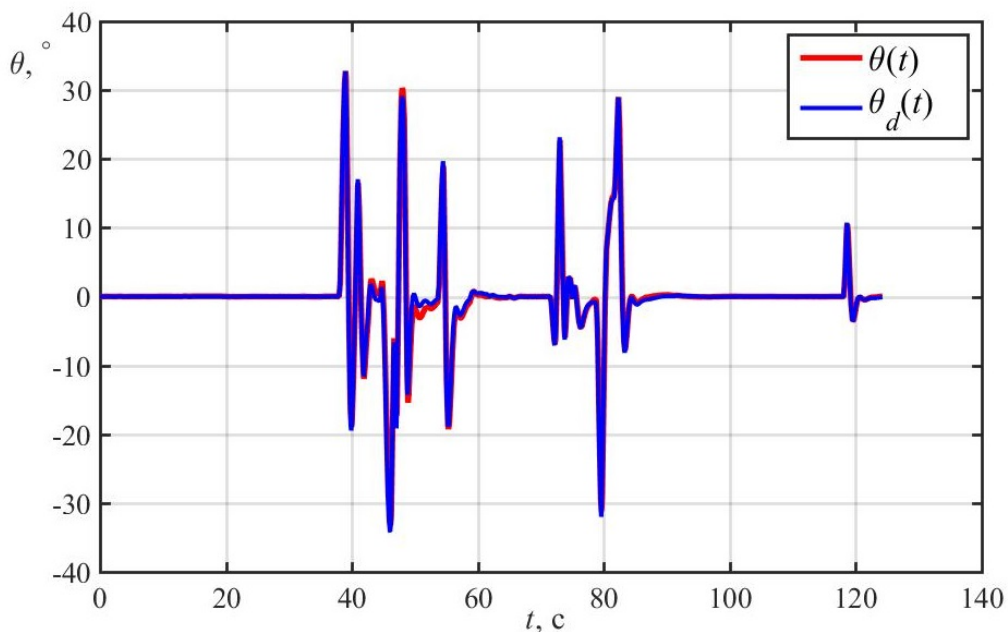


Рис. 4. График изменения угла крена БПЛА

Апробация предлагаемых в статье решений была проведена в VirSim на примере моделирования движения БПЛА (квадрокоптера) с виртуальными датчиками, параметры которых были взяты из [3, с. 14], [14], [15] и [16]. Для калибровки датчиков было выбрано начальное состояние летательного аппарата, когда он располагается на ровной горизонтальной поверхности и неподвижен. Управление движением квадрокоптера реализовано с помощью специального тренажерного пульта. На рисунках 3 и 4 приводятся графики зависимостей от времени вычисленных углов ϕ , θ и их эталонных (точных) углов ϕ_d , θ_d при движении БПЛА в горизонтальной плоскости. Из графиков видно, что вычисленные

углы Эйлера обладают точностью, необходимой для реализации движения БПЛА, и при этом соблюдаются переходные процессы при изменении ориентации квадрокоптера, которые характерны для реальных аппаратов. Предложенные в статье методы и подходы также были апробированы на виртуальной модели вертолета соосной схемы (см. рис. 5), предназначенного для фото и видеосъемки на Марсе. Эта модель содержит такие виртуальные датчики, как акселерометр, гироскоп и инклинометр для измерения начальной ориентации аппарата, когда он находится на поверхности Марса. Результаты апробации в VirSim показали адекватность и эффективность предложенных в статье методов и подходов.

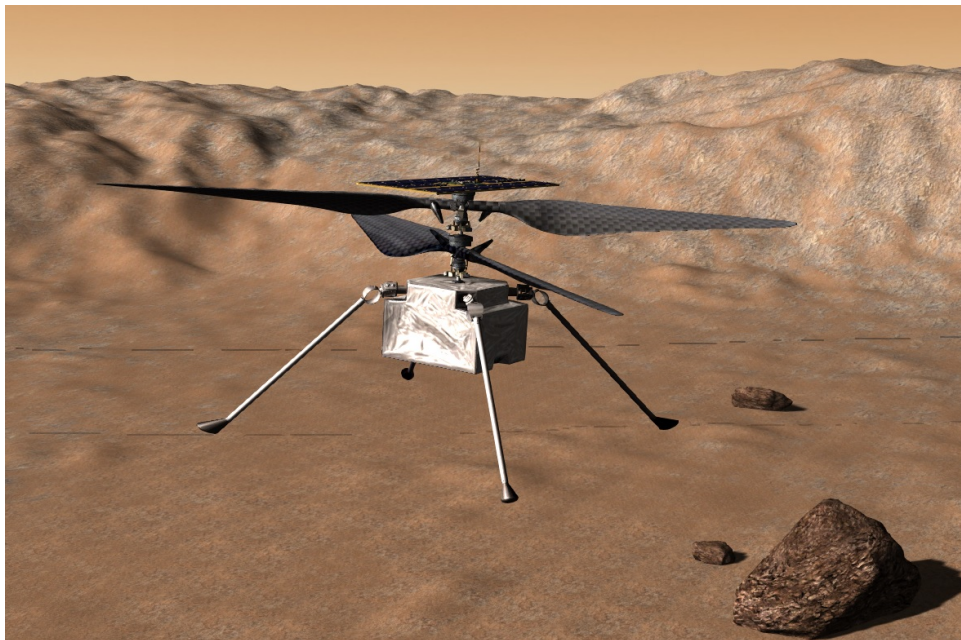


Рис. 5. Виртуальная модель марсианского вертолета соосной схемы

Заключение

В данной работе предложены методы и подходы имитационного моделирования инерциальных и магнитных датчиков (акселерометр, гироскоп и магнитометр) в системах виртуального окружения. Разработан подход для вычисления углов ориентации объектов, который основан на калибровке показаний датчиков, интегрирования угловых скоростей и применении комплементарного фильтра. Предложенные в статье методы и подходы также могут быть использованы для расчета траектории движения виртуальных объектов и решения других практических задач в системах виртуального окружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А. Г. *Микроэлектромеханические системы*: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ; 2016. 171 с.
2. LaValle S., Yershova A., Katsev M., Antonov M. Head Tracking for the Oculus Rift. *Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference*. Hong Kong, China; 2014. P. 187–194. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6906608.
3. Aranburu A. *IMU Data Processing to Recognize Activities of Daily Living with Smart Headset*. University of California; 2018. 106 p.
4. Renaudin V., Combettes C. Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)-Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation. *Sensors*. 2014;14:22864–22890. DOI: 10.3390/s141222864.
5. Kok M., Hol J. D., Schon T. B. Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. *Foundations and Trends in Signal Processing*. 2017;11(1–2):1–153. DOI: 10.1561/20000000094.
6. Павлов Д. В., Лукин К. Г., Петров М. Н. Разработка имитационной модели MEMS-акселерометра в среде Simulink. *Вестник НовГУ*. 2016;4:28–33.

7. Narkhede P., Poddar S., Walambe R., Ghinea G., Kotecha K. Cascaded Complementary Filter Architecture for Sensor Fusion in Attitude Estimation. *Sensors*. 2021;21:1–18. DOI: 10.3390/s21061937.
8. Valenti R. G., Dryanovski I., Xiao J. Z. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs. *Sensors*. 2015;15(8):19302–19330. DOI: 10.3390/s150819302.
9. Pedley M. *High-Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer*. Freescale Semiconductor Application Note. Austin, TX, USA; 2015.
10. Roetenberg D., Luinge H. J., Baten C. T., Veltink P. H. Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil.* 2005;13:395–405. DOI: 10.1109/TNSRE.2005.847353.
11. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения Virsim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
12. Rogers R. M. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. AIAA Education Series; 2000.
13. Дронг В. И., Дубинин В. В., Ильин М. М. и др. *Курс теоретической механики: учебник для вузов*; под общ. ред. К. С. Колесникова. 3-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана; 2005. 736 с.
14. *Accelerometer Sensor Parameters – MATLAB*. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/accelparams.html>.
15. *Gyroscope Sensor Parameters – MATLAB*. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/guoparams.html>.
16. *Magnetometer Sensor Parameters – MATLAB*. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/magparams.html>.