

УДК 527.62, 629.05

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

© С. В. Соколов, Е. Г. Чуб

*Ростовский государственный экономический университет (РИНХ),
344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 69
E-mail: elenachub111@gmail.com*

В настоящее время при решении задачи автономной навигации по параметрам оптического потока, снимаемого видеокамерой во время движения объекта, определяются только составляющие линейной и угловой скоростей объекта. Подобное определение скоростей является лишь частью общей задачи навигации — текущего позиционирования объекта и определения его угловой ориентации — и не позволяет решить её в целом. В связи с этим рассмотрен интеграционный подход, позволяющий объединить возможности инерциальной навигационной системы, которая обеспечивает решение задачи автономной навигации в целом, и системы навигации по оптическому потоку, позволяющей осуществлять автономное наблюдение параметров линейного и углового движений с минимальными аппаратными затратами. Поскольку при использовании этих систем серьёзную проблему представляет сложность учёта помех с различной вероятностной природой, то синтез стохастической модели предложенной интегрированной инерциально-оптической системы проведён с учётом возможности дальнейшего применения методов, учитывающих влияние помех при оценке навигационных параметров объекта, т. е. методов современной теории стохастической фильтрации. В результате для оценки полного вектора параметров движения объекта по измерениям интегрированной инерциально-оптической системы навигации построен модифицированный расширенный фильтр Калмана, учитывающий корреляцию шумов объекта и наблюдателя. Проведён численный эксперимент, иллюстрирующий эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, параметры оптического потока, инерциально-оптическая навигационная система, расширенный фильтр Калмана.

DOI: 10.15372/AUT20240608

EDN: BDOMRV

Введение. Современное развитие навигационных систем (НС) предполагает две противоречивые тенденции — дальнейшее повышение точности решения навигационной задачи при постоянном снижении стоимости самих систем. Одним из эффективных направлений решения этих задач является комплексирование систем навигации на различных физических принципах при наличии бортового вычислителя, обеспечивающего возможность процедуры оценки навигационных параметров по измерениям чувствительных элементов таких НС [1–4]. Наиболее популярной в настоящее время является интеграция спутниковых и инерциальных НС (ИНС), включающая слабосвязанную, сильносвязанную и глубокую интеграции [5–7]. Несмотря на проработанность многих аспектов инерциально-спутниковой интеграции, её основной проблемой остаётся потеря точности НС на длительных интервалах времени при невалидности спутниковых сообщений, характерной для горного рельефа, высотной городской застройки, туннелей и пр. В качестве альтернативного варианта интеграции с инерциальной НС может быть выбрано комплексирование с системой автономной навигации по оптическому потоку [8–21]. Основным направлением публикаций на эту тему является поиск наименее затратных в вычислительном отношении и

более точных алгоритмов определения линейной и угловой скоростей объекта по изменению интенсивности оптического потока, регистрируемого во время движения. Но определение линейной и угловой скоростей объекта, осложнённое необходимостью учёта помех, вероятностные характеристики которых, как правило, не определены, является лишь частью общей задачи навигации — текущего позиционирования объекта и определения его угловой ориентации — и не позволяет решить её в целом.

Постановка задачи. В связи с этим представляется весьма актуальной разработка подходов, объединяющих как возможности ИНС и систем навигации по оптическому потоку (СНОП), так и методов, учитывающих влияние помех при оценке навигационных параметров объекта, т. е. методов современной теории стохастической фильтрации [3, 4, 22]. Поставленную проблему будем решать на основе интеграции классической бесплатформенной ИНС (БИНС) и традиционной СНОП. Для возможности формирования решения в самом общем случае введём следующие системы координат (СК) [2, 5, 7, 23]:

— приборную СК (ПСК) $J(0xyz)$ с началом в центре масс (ЦМ) объекта, оси которой направлены по взаимно ортогональным осям чувствительности чувствительных элементов (ЧЭ) БИНС;

— невращающуюся инерциальную СК (ИСК) $I(O\xi\eta\zeta)$ с началом в центре сферы Земли, осью $O\eta$, совпадающей с вектором угловой скорости Земли Ω , осью $O\zeta$, лежащей в начальный момент времени в плоскости нулевого меридиана, и осью $O\xi$, дополняющей систему координат до правой;

— сопровождающую СК (ССК) $S(OXYZ)$ с началом в ЦМ объекта, ось OY которой лежит в плоскости местного меридиана, ось OZ направлена от центра Земли по местной вертикали, а ось OX дополняет систему координат до правой.

Полагаем также, что измерительный комплекс БИНС состоит из трёх акселерометров и трёх датчиков угловой скорости (ДУС), оси чувствительности которых направлены по осям ПСК.

Решение задачи. Общность решения задачи навигации предполагает инвариантность математической модели БИНС к характеру движения объекта, особенностям его конструкции, модели возмущающих воздействий и т. п. В связи с этим в качестве модели БИНС, инвариантной ко всем перечисленным факторам, используем далее уравнения БИНС в самой общей нелинейной форме [2, 7, 23]:

$$\begin{vmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin \gamma / \cos \beta & \cos \gamma / \cos \beta & 0 \\ \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta & \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta & 1 \end{vmatrix} (Z_d - W_d),$$

$$\begin{vmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\varphi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & (\cos \varphi)^{-1} \\ -1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -V_Y \\ V_X \end{vmatrix} (r + h)^{-1}, \quad (1)$$

$$\begin{vmatrix} \dot{V}_X \\ \dot{V}_Y \\ \dot{V}_Z \end{vmatrix} = C^T(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi) Z_a + \left(\begin{vmatrix} 0 \\ 2 \Omega \cos \varphi \\ \Omega \sin \varphi \end{vmatrix} + (r + h)^{-1} \begin{vmatrix} -V_Y \\ V_X \\ V_X \operatorname{tg} \varphi \end{vmatrix} \right) \times \begin{vmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{vmatrix} -$$

$$- \begin{vmatrix} 0 \\ -\Omega^2(r + h) \cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ \Omega^2(r + h) \cos^2 \varphi + g \end{vmatrix} - C^T(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi) W_a, \quad \dot{h} = V_Z.$$

В приведённых уравнениях состояния БИНС приняты следующие обозначения: α, β, γ — углы Эйлера — Крылова, определяющие ориентацию ПСК относительно ИСК; Z_d — вектор измерений ДУС; W_d — вектор помех измерения ДУС, аппроксимируемый далее белым гауссовским шумом (БГШ) с нулевым математическим ожиданием и матрицей интенсивностей D_d ; λ — долгота; φ — широта ЦМ объекта; $V_S = [V_X \ V_Y \ V_Z]^\top$ — вектор скорости объекта относительно Земли; r — радиус Земли; $h = h_0 + \int_0^t V_z(s) dS$ — текущая высота объекта; h_0 — начальная высота; Ω — угловая скорость вращения Земли; g — гравитационное ускорение; Z_a — вектор выходных сигналов акселерометров; W_a — вектор помех акселерометров, аппроксимируемый БГШ с нулевым средним и матрицей интенсивностей D_a ; $C(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi) = D(\alpha, \beta, \gamma)B^\top(\lambda, \varphi)$ — матрица поворота 2-го рода [23] ПСК относительно ССК; $D(\alpha, \beta, \gamma)$ — матрица поворота ПСК относительно ИСК; $B(\lambda, \varphi)$ — матрица поворота ССК относительно ИСК [7].

В канонической форме Ланжевена стохастические уравнения БИНС (1), полученные при самых общих предположениях о движении объекта и стохастическом характере помех ЧЭ БИНС, можно представить как

$$\dot{Y} = F(Y, t) + F_1(Y, t)W_Y, \quad (2)$$

где $Y = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \lambda \ \varphi \ V_X \ V_Y \ V_Z \ h]^\top$, $Y(0) = Y_0$, $W_Y = [W_d^T \ W_a^T]^\top$. Модель (2) является полной стохастической моделью БИНС, инвариантной к характеру движения объекта и обеспечивающей возможность её применения при построении интегрированной НС в качестве базовой модели вектора навигационных параметров. Необходимость интеграции обусловлена тем обстоятельством, что измерения всех ЧЭ БИНС уже использованы при описании динамики полного вектора навигационных параметров в стохастической дифференциальной форме (2). А для оценки этих параметров с применением методов стохастической фильтрации обязательно наличие наблюдателя параметров состояния системы [22], т. е. дополнительных измерений, несущих информацию о всех оцениваемых переменных модели (2) (которых уже нет в БИНС). В связи с этим в качестве такого наблюдателя параметров движения объекта далее рассмотрим систему навигации по оптическому потоку, обладающую такими преимуществами, как конструктивная простота и автономность.

Модель системы навигации по оптическому потоку. В современных СНОП используются различные методы для получения оценки параметров движения объекта посредством обработки информации, заключённой в изменении интенсивности, контраста, цветовой гаммы (обобщённо — «яркости») отражённого светового излучения [14, 16, 18]. В качестве одного из основных подходов к оценке параметров движения по последовательности монокулярных изображений можно выделить применение методов, основанных на вычислении значений оптического потока [9–21]. В настоящее время эта задача решается в детерминированной постановке [15–21] непосредственным вычислением вектора оптического потока из так называемого основного уравнения оптического потока с последующим определением параметров движения путём решения системы нелинейных уравнений. Но при этом следует отметить, что использование подобного подхода позволяет вычислить лишь масштабированные линейную и угловую скорости, а также не обеспечивает принципиальной возможности формирования высокоточного решения в связи с зашумлённостью реальных изображений и методическими погрешностями подхода [9–21]. В связи с этим рассмотрим иной подход к оценке навигационных параметров объекта — на основе интегрирования СНОП с БИНС и использования измерений СНОП в качестве вектора

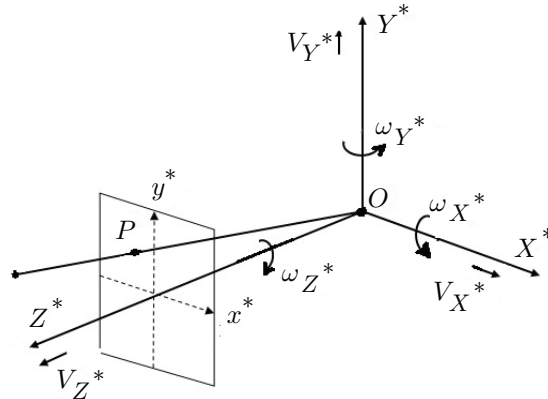


Рис. 1. Система координат, связанная с видеокамерой

наблюдений навигационных параметров, описываемых уравнениями БИНС (2), с последующим применением аппарата теории стохастической фильтрации. Для построения модели наблюдателя вектора навигационных параметров, формируемых СНОП, введём дополнительно СК $OX^*Y^*Z^*$, связанную с видеокамерой (ВСК) (рис. 1), где $x^* = f X^*/Z^*$, $y^* = f Y^*/Z^*$ — известные координаты проекции точки сканирования P на плоскость изображения; f — фокусное расстояние; z^* — глубина изображения (проекция точки сканирования P); V_X^*, V_Y^*, V_Z^* — проекции вектора линейной скорости ЦМ объекта на оси ВСК; $\omega_X^*, \omega_Y^*, \omega_Z^*$ — проекции вектора угловой скорости объекта на оси ВСК, ось OZ^* совпадает с линией визирования видеокамеры.

В ВСК уравнения, связывающие значения вектора оптического потока с параметрами движения объекта [15–21], имеют вид

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} u \\ \nu \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} f(-V_X^*/Z^* - \omega_Y^* + \omega_Z^* y^*) - f x^*(-V_Z^*/Z^* - \omega_X^* y^* + \omega_Y^* x^*) \\ f(-V_Y^*/Z^* - \omega_Z^* x^* + \omega_X^*) - f y^*(-V_Z^*/Z^* - \omega_X^* y^* + \omega_Y^* x^*) \end{vmatrix} = \\ &= \frac{f}{Z^*} \begin{vmatrix} -1 & 0 & x^* \\ 0 & -1 & y^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_X^* \\ V_Y^* \\ V_Z^* \end{vmatrix} + f \begin{vmatrix} y^* x^* & -(x^{*2} + 1) & y^* \\ (y^{*2} + 1) & -y^* x^* & -x^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \omega_X^* \\ \omega_Y^* \\ \omega_Z^* \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где u, ν — параметры оптического потока (компоненты скорости яркостной картины, взятые в точке сканирования).

При использовании СНОП полагаем, что оптическая информация снимается с поверхности Земли (линия визирования видеокамеры в невозмущённом состоянии направлена к центру Земли), при этом начало ВСК совпадает с началом ПСК, в начальный момент времени ось OX^* ВСК совпадает с направлением оси Oy ПСК, ось OY^* ВСК — с направлением оси Ox ПСК и ось OZ^* ВСК направлена противоположно оси Oz ПСК. В этом случае в проекциях на оси ПСК уравнения вектора оптического потока примут вид

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} u \\ \nu \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} f(V_y/Z - \omega_x + \omega_z x) + f y(-V_z/Z + \omega_y x - \omega_x y) \\ f(V_x/Z - \omega_z y + \omega_y) + f x(-V_z/Z + \omega_y x - \omega_x y) \end{vmatrix} = \\ &= \frac{f}{Z} \begin{vmatrix} 0 & 1 - y \\ 1 & 0 - x \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{vmatrix} + f \begin{vmatrix} -(y^2 + 1) & yx & x \\ -yx & x^2 + 1 & -y \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

где x, y — известные координаты проекции точки сканирования P на плоскость изображения; $Z = Z(x, y)$ — глубина точки сканирования P ; V_x, V_y, V_z — проекции вектора линейной скорости ЦМ объекта на оси ПСК; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проекции вектора угловой скорости объекта на оси ПСК.

Для возможности использования полученных уравнений в качестве уравнений наблюдателя вектора Y представим входящие в них переменные в ССК. В случае невозмущённого движения видеокамеры при сканировании подстилающей поверхности глубина изображения точки сканирования P определяется как $Z(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$, следовательно, в общем случае при вращении приборного трёхгранника (т. е. видеокамеры) глубина изображения равна

$$Z(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2 + \frac{h^2}{c_{33}^2(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)}},$$

где $c_{33}(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)$ — соответствующий элемент матрицы $C(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)$. Поскольку векторы линейной и угловой скоростей в ПСК могут быть представлены как

$$|V_x \ V_y \ V_z|^\top = C(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)V_S, \quad |\omega_x \ \omega_y \ \omega_z|^\top = D(\alpha, \beta, \gamma)(Z_d - W_d),$$

то окончательно уравнения вектора оптического потока в функции оцениваемого вектора Y могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} u \\ \nu \end{vmatrix} &= f \left(x^2 + y^2 + \frac{h^2}{c_{33}^2(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)} \right)^{-1/2} \begin{vmatrix} 0 & 1 & -y \\ 1 & 0 & -x \end{vmatrix} C(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)V_S + \\ &+ f \begin{vmatrix} -(y^2 + 1) & yx & x \\ -yx & x^2 + 1 & -y \end{vmatrix} D(\alpha, \beta, \gamma)(Z_d - W_d). \end{aligned} \quad (5)$$

Как отмечено в работах [9–14, 18–21], в реальной СНОП компоненты вектора оптического потока u, ν в каждой точке сканирования измеряются с неизбежными погрешностями W_u, W_ν . В этом случае измеряемый в точке P вектор оптического потока $Z_{\text{СНОП}}$ принимает вид

$$\begin{aligned} Z_{\text{СНОП}} = \begin{vmatrix} u \\ \nu \end{vmatrix} &= f \left(x^2 + y^2 + \frac{h^2}{c_{33}^2(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)} \right)^{-1/2} \begin{vmatrix} 0 & 1 & -y \\ 1 & 0 & -x \end{vmatrix} C(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)V_S + \\ &+ f \begin{vmatrix} -(y^2 + 1) & yx & x \\ -yx & x^2 + 1 & -y \end{vmatrix} D(\alpha, \beta, \gamma)Z_d - \\ &- f \begin{vmatrix} -(y^2 + 1) & yx & x \\ -yx & x^2 + 1 & -y \end{vmatrix} D(\alpha, \beta, \gamma)W_d + \begin{vmatrix} W_u \\ W_\nu \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что в общем случае вероятностные характеристики помех W_u, W_ν неизвестны, а также то, что параметры оптического потока могут быть вычислены сразу в N точках сканирования, для возможности использования методов нелинейной фильтрации усредним полученные во всех N точках (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, N$, сигналы наблюдения

$Z_{\text{СНОП}_i}$ (6). Поскольку помехи параметров оптического потока равномошны для каждой точки сканирования, то в силу центральной предельной теоремы распределение шумов

$$W_{u*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{ui}, \quad W_{\nu*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{\nu i}$$

уже при $N \geq 3$ будет близко к гауссовскому, постоянно приближаясь к нему с ростом N [22], что даёт основание аппроксимировать помехи W_{u*} , $W_{\nu*}$ центрированным БГШ с интенсивностями D_{u*} , $D_{\nu*}$. Окончательно искомый наблюдатель вектора навигационных параметров, обеспечивающий возможность применения существующих методов нелинейной фильтрации [3, 22], принимает вид

$$Z_H = A_1(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi, h)C(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)V_S + A_2D(\alpha, \beta, \gamma)Z_d -$$

$$- |A_2D(\alpha, \beta, \gamma)| - E_2 |W_d \ W_{u*} \ W_{\nu*}|^\top,$$

$$A_1(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi, h) = \frac{f}{N} \sum_{i=1}^N \left(x_i^2 + y_i^2 + \frac{h^2}{c_{33}^2(\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \varphi)} \right)^{-1/2} \begin{vmatrix} 0 & 1 & -y_i \\ 1 & 0 & -x_i \end{vmatrix},$$

$$A_2 = \frac{f}{N} \sum_{i=1}^N \begin{vmatrix} -(y_i^2 + 1) & y_i x_i & x_i \\ -y_i x_i & x_i^2 + 1 & -y_i \end{vmatrix},$$

где E_2 — единичная матрица размерности 2, или в общем виде

$$Z_H = H(Y, t) + H_0(Y)W_H, \quad W_H = |W_d \ W_{u*} \ W_{\nu*}|^\top. \quad (8)$$

Важной особенностью полученного наблюдателя (8) является явная зависимость его информационной части (функций H , H_0) от всех компонентов оцениваемого вектора Y , что положительно влияет на сходимость и точность процесса фильтрации.

Уравнения оценки навигационных параметров в интегрированной НС. Полученные уравнения (2), (8), приведённые в виде «объект—наблюдатель», позволяют окончательно решить поставленную задачу нелинейной фильтрации вектора Y на основе формирования расширенного фильтра Калмана с коррелированными шумами объекта и наблюдателя [4, 22]:

$$\dot{\hat{Y}} = F(\hat{Y}, t) + K(\hat{Y}, t)(Z_H - H(\hat{Y}, t)),$$

$$K(\hat{Y}, t) = \left(R(\hat{Y}, t) \frac{\partial H^\top(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} + S(\hat{Y}, t) \right) D_H^{-1}(\hat{Y}), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{R}(\hat{Y}, t) = & \left(\frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} - S(\hat{Y}, t) D_H^{-1}(\hat{Y}) \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right) R(\hat{Y}, t) + \\ & + R(\hat{Y}, t) \left(\frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} - S(\hat{Y}, t) D_H^{-1}(\hat{Y}) \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^\top - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - R(\hat{Y}, t) \frac{\partial H^\top(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} D_H^{-1}(\hat{Y}) \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} R(\hat{Y}, t) + \\
& + F_1(\hat{Y}, t) D_Y F_1^\top(\hat{Y}, t) - S(\hat{Y}, t) D_H^{-1}(\hat{Y}) S^\top(\hat{Y}, t),
\end{aligned}$$

где $\hat{Y}$ — оценка вектора навигационных параметров $Y(t)$, $R(\hat{Y}, t)$ — апостериорная ковариационная матрица,

$$\begin{aligned}
D_Y &= \begin{vmatrix} D_d & 0 \\ 0 & D_a \end{vmatrix}, \quad D_H(\hat{Y}) = H_0(\hat{Y}) \begin{vmatrix} D_d & 0 & 0 \\ 0 & D_{u^*} & 0 \\ 0 & 0 & D_{\nu^*} \end{vmatrix} H_0^\top(\hat{Y}), \\
S(\hat{Y}, t) &= F_1(\hat{Y}, t) \begin{vmatrix} D_d : \mathbf{0} \\ \dots\dots\dots \\ \mathbf{0} \end{vmatrix} H_0^\top(\hat{Y}).
\end{aligned}$$

Как показывает практика, применение расширенного фильтра Калмана (9) обеспечивает компромисс по критерию «точность—вычислительные затраты» при реализации в вычислителях общего и специального назначения. Для иллюстрации эффективности предложенного подхода был проведён следующий численный эксперимент.

П р и м е р. Рассматривалось движение беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на временном интервале $[0, 1000]$ с со следующими параметрами линейного и углового движений в ПСК: $V_x = 25 + 3 \cos(0,1t)$ м/с, $V_y = 15 + 1,5 \sin(0,2t)$ м/с, $V_z = 0,15 \cos(10^{-2}t)$ м/с, $h_0 = 60$ м, $\omega_x = 0,22 \cos(0,02t)$ °/с, $\omega_y = 0,3 \sin(0,04t)$ °/с, $\omega_z = 0,04 \cos(0,01t)$ °/с, $\lambda_0 = \pi/3$ рад, $\varphi_0 = \pi/4$ рад. В первом варианте моделирования рассматривалось размещение модуля БИНС на БПЛА с использованием демпферной системы, в силу чего в качестве компонентов вектора помех измерения акселерометров W_a рассматривались только их собственные шумы, аппроксимируемые гауссовскими последовательностями с нулевыми средними и дисперсиями $D_a = (5 \cdot 10^{-3})^2$ (м/с²)². Измерения ДУС моделировались путём аддитивного наложения векторной гауссовской последовательности W_d с нулевым средним и матрицей дисперсий $D_d = (10^{-4})^2 E_3$ (рад/с²)², где E_3 — единичная матрица размерности 3, на вектор проекций угловой скорости в ИСК, определяемый как $D^\top(\alpha, \beta, \gamma) |\omega_x \ \omega_y \ \omega_z|^\top$. Моделирование измерений СНОП осуществлялось в соответствии с алгоритмом усреднения (7) при $f = 25$ мм для 100 пикселей (x_i, y_i) в координатной сетке $\{x : [0; 5], y : [0; 5]\}$ с шагом 0,5 и использованием в качестве помех измерения W_{u^*}, W_{ν^*} гауссовских последовательностей с нулевыми средними и дисперсиями $(D_{u^*}, D_{\nu^*}) = (2 \cdot 10^{-4})^2$ (м/с)². По полученным измерениям СНОП реализован алгоритм расширенного фильтра Калмана (9) с применением метода Рунге — Кутты 4-го порядка с шагом 0,01 с. На рис. 2 представлены графики ошибок оценки углов α, β, γ , определяющих ориентацию ПСК относительно ИСК, на рис. 3 — графики ошибок оценки широты, долготы и высоты БПЛА.

Анализ приведённых значений ошибок оценивания углов ориентации и координат БПЛА позволяет сделать вывод, во-первых, об устойчивости процесса их оценивания, а во-вторых, об удовлетворении диапазонов изменения значений ошибок требованиям, предъявляемым не только к современным, но и перспективным автономным навигационным системам: ошибка оценки угла α не превысила на всём интервале моделирования 0,15 град,

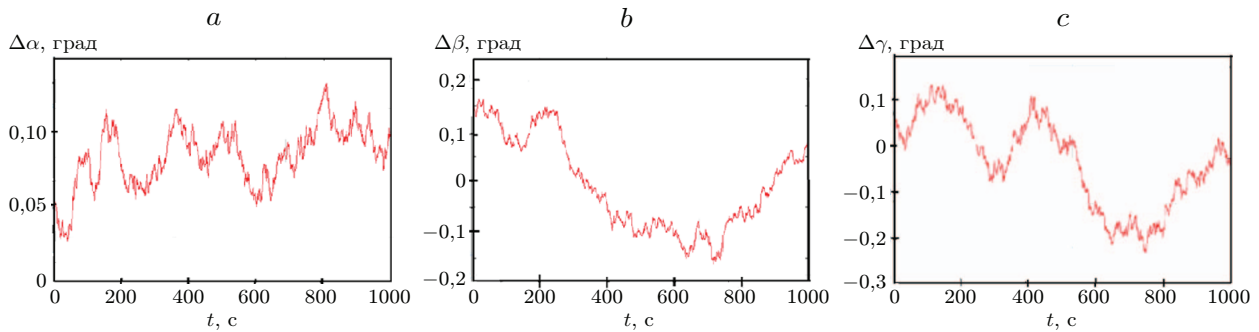


Рис. 2. Изменение во времени ошибок оценки углов α (a), β (b), γ (c) при демпфировании вибраций силовой установки БПЛА

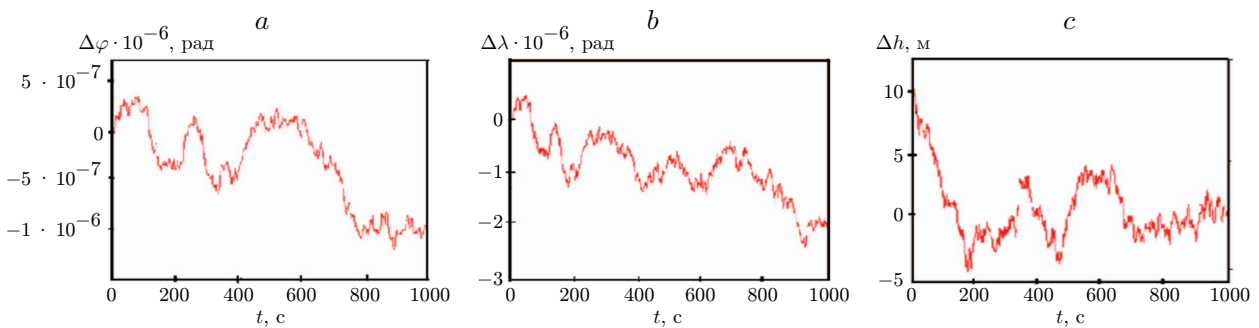


Рис. 3. Изменение во времени ошибок оценки координат БПЛА при демпфировании вибраций силовой установки БПЛА: широты (a), долготы (b) и высоты (c)

угла β — 0,17 град, угла γ — 0,22 град; по широте ошибка оценки в конце интервала моделирования не превысила 10^{-6} рад (6 м), по долготе — $2,2 \cdot 10^{-6}$ рад (6,7 м), по высоте — 0,9 м.

Второй вариант моделирования предполагал жёсткое крепление модуля БИНС на корпусе БПЛА (т. е. отсутствие демпфера), приводящее к необходимости введения в состав помех измерения акселерометров шумов, обусловленных вибрациями винтов и моторов БПЛА. В этом случае помехи измерения акселерометров аппроксимировались гауссовскими последовательностями с нулевыми средними и дисперсиями $D_a = (1,2)^2 \text{ (м/с}^2\text{)}^2$. Для данного варианта моделирования графики ошибок оценки углов α , β , γ представлены на рис. 4, графики ошибок оценки широты, долготы и высоты БПЛА — на рис. 5.

Как показывают результаты моделирования, увеличение интенсивности помех акселерометров наиболее сильно повлияло на параметры позиционирования БПЛА: ошибки оценки в конце интервала моделирования увеличились по широте до $2,5 \cdot 10^{-6}$ рад (15 м), по долготе — до $6,5 \cdot 10^{-6}$ рад (19,8 м) и по высоте — до 5 м. При этом ошибки оценки угловой ориентации, наиболее проблемной с точки зрения её определения для БПЛА, изменились незначительно — увеличилась в основном только ошибка оценки угла α (до 0,3 град).

Сравнительный анализ приведённых ошибок позиционирования в обоих вариантах моделирования свидетельствует о необходимости использования систем демпфирования вибраций силовой установки для БПЛА, режимы работы которых предполагают высокоточное позиционирование, и о возможности жёсткого крепления модуля БИНС для БПЛА, требующих средней точности определения его пространственных координат (в пределах заданной зоны наблюдения).

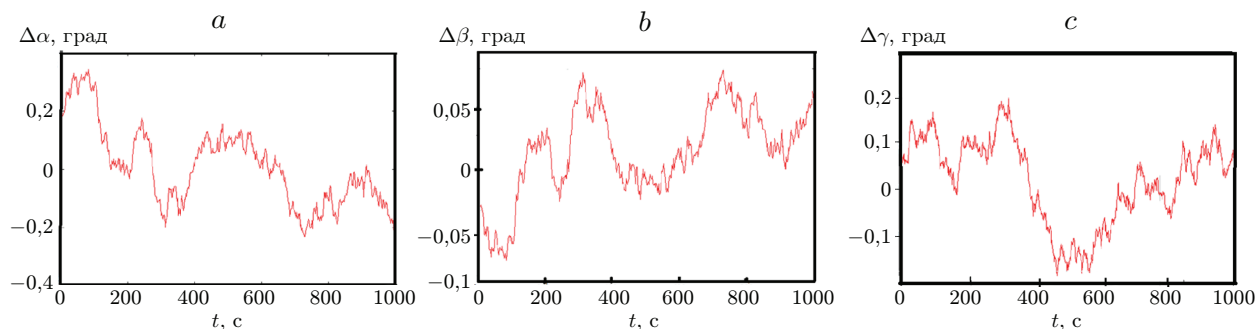


Рис. 4. Изменение во времени ошибок оценки углов α (a), β (b), γ (c) при жёстком креплении модуля БИНС

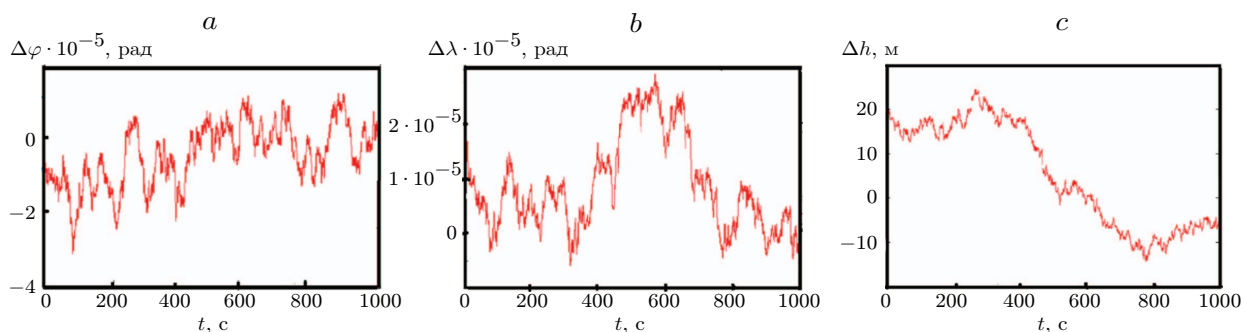


Рис. 5. Изменение во времени ошибок оценки координат БПЛА при жёстком креплении модуля БИНС: широты (a), долготы (b) и высоты (c)

Заключение. В целом полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование СНОП в качестве наблюдателя параметров движения объекта при комплексировании с БИНС оказывается более эффективным по сравнению с непосредственным определением по параметрам оптического потока только составляющих линейной и угловой скоростей как по вычислительным затратам, так и по точности оценки вектора навигационных параметров объекта [8–21]. Преимущественными особенностями рассмотренной инерциально-оптической НС являются её автономность, невысокая размерность наблюдателя (равная 2), а также возможность наблюдения всех параметров движения объекта, что чрезвычайно важно для обеспечения устойчивости и точности процесса оценки навигационных параметров.

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ № 1023080200012-3-2.3.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных манёвренных летательных аппаратов / Под ред. М. Н. Красилыдикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2009. 556 с.
2. Анучин О. Н., Емельянцева Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под ред. В. Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 356 с.
3. Биард Р. У., МакЛэйн Т. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика: Пер. с англ. А. И. Демьяникова / Под ред. Г. В. Анцева. М.: Техносфера, 2015. 312 с.
4. Соколов С. В., Погорелов В. А. Стохастическая оценка, управление и идентификация в высокоточных навигационных системах. М.: Физматлит, 2016. 264 с.

5. Бакитько Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
6. Емельянцева Г. И., Степанов А. П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Под ред. В. Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
7. Розенберг И. Н., Соколов С. В., Уманский В. И., Погорелов В. А. Теоретические основы тесной интеграции инерциально-спутниковых навигационных систем. М.: Физматлит, 2018. 305 с.
8. Али Б., Садеков Р. Н., Цодокова В. В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // Гироскопия и навигация. 2022. **30**, № 4. С. 87–105.
9. Mittal M., Mohan R., Burgard W., Valada A. Vision-Based Autonomous UAV Navigation and Landing for Urban Search and Rescue // Robotics Research. Vol. 20. Springer Proceedings in Advanced Robotics. Cham: Springer, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1906.01304.
10. Зоев И. В., Марков Н. Г., Рыжова С. Е. Интеллектуальная система компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга технологических объектов предприятий нефтегазовой отрасли // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. **330**, № 11. С. 34–49.
11. Geiger A., Lenz P., Stiller C., Urtasun R. Vision meets robotics: The KITTI dataset // Int. Journ. Robotics Research. 2013. **32**, Iss. 11. P. 1231–1237.
12. Raudies F., Neumann H. A review and evaluation of methods estimating ego-motion // Computer Vision and Image Understanding. 2012. **116**, Iss. 5. P. 606–633.
13. Пешехонов В. Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 2022. **30**, № 1. С. 3–11.
14. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989. 487 с.
15. Пономарев Е. С., Григорьев А. С. Алгоритмы вычисления оптического потока в задаче определения собственного движения // Сб. тр. 39-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы». М.: ИППИ РАН, 2015. С. 457–470.
16. Baker S., Scharstein D., Lewis J. P. et al. A Database and Evaluation Methodology for Optical Flow // Int. Journ. Computer Vision. 2011. **92**, Iss. 1. P. 1–31.
17. Fleet D. J., Weiss Y. Optical Flow Estimation // Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. Ch. 15. Boston: Springer, 2006. P. 239–258.
18. Жук Р. С., Залесский Б. А., Троцкий Ф. С. Визуальная навигация автономно летящего БПЛА с целью его возвращения в точку старта // Информатика. 2020. **17**, № 2. С. 17–24.
19. Mirabdollah M. H., Mertsching B. On the Second Order Statistics of Essential Matrix Elements / Eds. by X. Jiang, J. Hornegger, R. Koch // Pattern Recognition. **8753**. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2014. P. 547–557.
20. Xu L., Jia J., Matsushita Y. Motion Detail Preserving Optical Flow Estimation // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI). 2011. **34**, Iss. 9. P. 1744–1757.
21. Ding L., Zhou J., Meng L., Long Z. A Practical Cross-View Image Matching Method between UAV and Satellite for UAV-Based Geo-Localization // Remote Sens. 2021. **13**, Iss. 1. 47.
22. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.
23. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.

Поступила в редакцию 04.03.2024

После доработки 15.04.2024

Принята к публикации 18.04.2024