

УДК 629.7.072.1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ZUPT-КОРРЕКЦИИ ДЛЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Е.С. Лобусов, А.В. Фомичёв

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: Evgeny.Lobusov@yandex.ru; AlexeyFomichev@mail.ru

Исследован способ повышения точности функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы, установленной на борту наземного подвижного объекта. Источником погрешностей функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы являются, в основном, неизвестные дрейфы векторного измерителя угловой скорости и смещения векторного измерителя линейного ускорения (т.е. собственные возмущения измерителей). Рассматриваемый способ в литературе известен, как режим ZUPT (zero velocity up-date), заключающийся в том, что в процессе движения подвижного объекта происходит уточнение погрешностей измерителей, в первую очередь, собственных погрешностей векторного измерителя угловой скорости, и их компенсация за счет периодических остановок объекта на короткий промежуток времени. Рассмотрены два варианта режима ZUPT. В первом варианте оцениваются собственные дрейфы векторного измерителя угловой скорости и угол азимута, во втором — только собственные дрейфы. На основе разработанных математических моделей для основных режимов функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы — режима начальной выставки и режима навигации — получено математическое описание двух вариантов ZUPT и предложены соответствующие алгоритмические решения, позволяющие определить и компенсировать погрешности векторного измерителя угловой скорости после выполнения режима.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, векторный измеритель угловой скорости, наземный подвижный объект, погрешность измерений, режим начальной выставки, режим навигации, режим zero velocity up-date.

STUDYING ZUPT CORRECTION MODE FOR A STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM OF THE GROUND MOVING OBJECT

E.S. Lobusov, A.V. Fomichev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: Evgeny.Lobusov@yandex.ru; AlexeyFomichev@mail.ru

A method to improve an accuracy of functioning of a strapdown inertial navigation system installed onboard the ground moving object is studied. Generally, drifts of the vector angular velocity meter and displacements of the vector linear angular accelerometer (i.e., intrinsic perturbations of the meters) are the source of errors of functioning of a strapdown inertial navigation system. The discussed method is known in literature as a mode of ZUPT (zero velocity update) consisting in updates

of errors of the meters (first of all intrinsic errors of the vector meter of angular velocity) during the object motion and their compensation at the expense of periodic short-time stops of the object. Two ZUPT variants are considered. In the first variant, the intrinsic drifts of the vector angular-velocity meter and the angle of azimuth are assessed, in the second variant, only intrinsic drifts are estimated. Based on the developed mathematical models for the main modes of functioning of the strapdown inertial navigation system (initial alignment and navigation), the mathematical description of the two ZUPT-mode variants is derived and the appropriate algorithmic solutions are offered, which allow the errors of the vector angular-velocity meter to be determined and compensated after the mode is performed.

Keywords: strapdown inertial navigation system, vector angular-velocity meter, ground moving object, measurement error, initial alignment mode, navigation mode, zero velocity update mode.

При установке бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на наземном подвижном объекте (ПО) возникает возможность реализации эффективного режима коррекции, создаваемой за счет остановки объекта. Для подобного режима коррекции в отечественной и зарубежной литературе принят специальный термин ZUPT (zero velocity up-date) [1–4].

Режим ZUPT относится к автономным режимам и позволяет оценить текущее состояние БИНС. Для достижения этой цели ПО останавливается и выполняется компенсация накопленной ошибки по линейной скорости, так как в неподвижном положении истинное значение скорости объекта равно нулю.

В настоящей работе рассмотрены два варианта режима ZUPT [5]. В первом варианте оцениваются собственные дрейфы входящего в состав БИНС векторного измерителя угловой скорости (ВИУС) и угол азимута. Во втором варианте лишь оцениваются собственные дрейфы ВИУС. Отличительная особенность математического описания двух вариантов ZUPT заключается в том, что в первом варианте необходимо сформировать уравнения относительно четырех неизвестных параметров, а во втором — записать уравнения относительно трех неизвестных параметров.

После выполнения режима ZUPT как в первом, так и во втором варианте компенсируются собственные погрешности ВИУС. Кроме того, в первом варианте выполняется установка рассчитанного значения угла азимута. Однако для успешного выполнения режима ZUPT в БИНС необходимо наложить ограничения на уровень угловых колебаний ПО. Значения их амплитуды должны быть незначительными.

Вариант ZUPT-1. Решение нелинейных уравнений относительно неизвестных собственных дрейфов и угла азимута. Для определения оценок собственных дрейфов ВИУС и оценки угла азимута в настоящей работе по результатам экспериментальных данных были получены следующие уравнения.

Для режима начальной выставки (РНВ) исходные уравнения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 \omega_{\oplus} \cos \varphi + \omega_{\pi 1}^S |_1) = b_1 \\ (\cos \alpha_0 \omega_{\oplus} \cos \varphi + \omega_{\pi 2}^S |_1) = b_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 + \bar{\omega}_{\pi 1}^S |_1) = \bar{b}_1 \\ (\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{\pi 2}^S |_1) = \bar{b}_2 \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

В РНВ оценивается угол азимута $\hat{\alpha}_0$:

$$\operatorname{tg} \hat{\alpha}_0 = \frac{(\sin \alpha_0 - \bar{\omega}_{\pi 1}^S |_1)}{(\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{\pi 2}^S |_1)} = \frac{-\bar{b}_1}{\bar{b}_2}. \quad (2)$$

После перевода БИНС в режим навигации (РН) и изменения его углового положения относительно ПО (поступательное движение объекта отсутствует) получают другие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 \omega_{\oplus} \cos \varphi + \omega_{\pi 1}^S |_2) + \sin \hat{\alpha}_0 \omega_{\oplus} \cos \varphi = b_3 \\ (\cos \alpha_0 \omega_{\oplus} \cos \varphi + \omega_{\pi 2}^S |_2) - \cos \hat{\alpha}_0 \omega_{\oplus} \cos \varphi = b_4 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 + \bar{\omega}_{\pi 1}^S |_2) + \sin \hat{\alpha}_0 = \bar{b}_3 \\ (\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{\pi 2}^S |_2) - \cos \hat{\alpha}_0 = \bar{b}_4 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

При этом для угла азимута имеется уравнение связи

$$\sin^2 \alpha_0 + \cos^2 \alpha_0 = 1.$$

Угловое положение БИНС относительно навигационной системы координат (НСК) можно выразить через элементы матрицы направляющих косинусов:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M |_1 = [\mathbf{m}_1 |_1, \mathbf{m}_2 |_1, \mathbf{m}_3 |_1], \quad \omega_{\pi 1}^S |_1 = \mathbf{m}'_1 |_1 \omega_{\pi}^B, \quad \omega_{\pi 2}^S |_1 = \mathbf{m}'_2 |_1 \omega_{\pi}^B, \\ \mathbf{V}_M |_2 = [\mathbf{m}_1 |_2, \mathbf{m}_2 |_2, \mathbf{m}_3 |_2], \quad \omega_{\pi 1}^S |_2 = \mathbf{m}'_1 |_2 \omega_{\pi}^B, \quad \omega_{\pi 2}^S |_2 = \mathbf{m}'_2 |_2 \omega_{\pi}^B. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (1)–(4) использованы следующие обозначения: «'» — операция транспонирования; нижние индексы у вертикальной черты $|_{1(2)}$ — два различных положения БИНС; черта сверху « $\bar{\quad}$ » — безразмерные значения, получаемые делением исходных уравнений на $\omega_{\oplus} \cos \varphi$; $\mathbf{V}_M |_1, \mathbf{V}_M |_2$ — матрицы ориентации для двух положений БИНС; $\bar{\mathbf{b}} = [\bar{b}_1, \bar{b}_2, \bar{b}_3, \bar{b}_4]$ — вектор измерений.

Постановка задачи: найти оценки вектора неизвестного собственного дрейфа БИНС $\omega_{\pi}^B = [\omega_{\pi 1}^B, \omega_{\pi 2}^B, \omega_{\pi 3}^B]'$ и угла азимута α_0 , удовлетворяющие системе нелинейных уравнений (1) и (3), по известным результатам проведенных измерений, выражаемых вектором $\bar{\mathbf{b}}$ и элементам матриц ориентации (4).

Особенности решения. В исходных уравнениях (1) и (3) фигурируют только горизонтальные приведенные к НСК проекции вектора собственного дрейфа ω_{π}^B . Поэтому при наиболее распространенной ситуации, когда измерения вектора $\bar{\mathbf{b}}$ проводятся при небольших отклонениях БИНС от местного горизонта, вертикальная компонента $\omega_{\pi 3}^B$

собственного дрейфа практически не проявится в исходных уравнениях, т.е. данная вертикальная компонента не является решением систем (1) и (3). Поэтому в РНВ дополнительно оценивается скорость ухода угла рыскания $\hat{\omega}_{п3}^S|_1 = b_5$ относительно вертикальной оси НСК. Скорость ухода относительно вертикальной оси отчетливо проявляется только при малом уровне внешних колебаний ПО и поэтому поддается обработке, например с помощью метода наименьших квадратов. Таким образом, к исходным уравнениям (1) и (3) добавляется еще одно скалярное уравнение измерений:

$$\hat{\omega}_{п3}^S|_1 = \mathbf{m}'_3|_1 \boldsymbol{\omega}_п^B = b_5. \quad (5)$$

Замечание. ■ В платформенных ИНС дрейф платформы относительно вертикальной оси и внешние колебания ПО разделены, поэтому скорость дрейфа может быть определена внешними измерениями. В этом случае уравнение (5) получается без существенных трудностей и ограничений на угловое движения ПО.

Следовательно, чтобы избавиться от оценки скорости ухода относительно вертикали необходимо, чтобы в одном из положений БИНС (1 или 2) отчетливо проявилась третья компонента собственного дрейфа, т.е. одно из положений БИНС должно существенно отличаться от горизонта. ■

Анализ структуры (1) и (3) позволяет предложить чрезвычайно простой путь решения. Выразим из системы уравнений (1) (первая пара уравнений) тригонометрические функции

$$\left. \begin{aligned} -\sin \alpha_0 &= \bar{b}_1 - \bar{\omega}_{п1}^S|_1 \\ \cos \alpha_0 &= \bar{b}_2 - \bar{\omega}_{п2}^S|_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

и подставим их во вторую пару уравнений (3). После несложных преобразований имеем

$$\left. \begin{aligned} \bar{\omega}_{п1}^S|_2 - \bar{\omega}_{п1}^S|_1 &= \bar{b}_3 - \bar{b}_1 - \sin \hat{\alpha}_0 \\ \bar{\omega}_{п2}^S|_2 - \bar{\omega}_{п2}^S|_1 &= \bar{b}_4 - \bar{b}_2 + \cos \hat{\alpha}_0 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

В качестве дополнения к системе (7) с учетом отмеченных особенностей решения введем следующее соотношение:

$$\hat{\omega}_{п3}^S|_1 = \mathbf{m}'_3|_1 \boldsymbol{\omega}_п^B = b_5. \quad (8)$$

Таким образом, возникает замкнутая линейная система уравнений (7) и (8) относительно вектора неизвестного собственного дрейфа БИНС $\boldsymbol{\omega}_п^B$. После определения вектора собственного дрейфа вычисляются тригонометрические функции по соотношениям (6), т.е. определяется уточненная оценка азимута.

В тех случаях, когда соотношение (5) отсутствует, следует решать исходную нелинейную систему уравнений (6) и (7):

$$\left. \begin{aligned} (\sin \alpha_0 - \bar{\omega}_{n1}^S|_1) = -\bar{b}_1 \\ (\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{n2}^S|_1) = \bar{b}_2 \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} \bar{\omega}_{n1}^S|_2 - \bar{\omega}_{n1}^S|_1 = \bar{b}_3 - \bar{b}_1 - \sin \hat{\alpha}_0 \\ \bar{\omega}_{n2}^S|_2 - \bar{\omega}_{n2}^S|_1 = \bar{b}_4 - \bar{b}_2 + \cos \hat{\alpha}_0 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Из второй пары уравнений (9) выбираются какие-либо две переменные собственного дрейфа ω_n^B , которые становятся функциями оставшегося только одного неизвестного собственного дрейфа. После этого из первой пары уравнений (9) тригонометрические функции выражаются через неизвестный собственный дрейф и находится тангенс уточненного азимута:

$$\operatorname{tg} \hat{\alpha}_0 = \frac{-\bar{b}_1 + \bar{\omega}_{n1}^S|_1}{\bar{b}_2 - \bar{\omega}_{n2}^S|_1},$$

где $\omega_{n1}^S|_1$ и $\omega_{n1}^S|_2$ — функции неизвестного собственного дрейфа.

Далее используются известные тригонометрические тождества

$$\sin \hat{\alpha} = \frac{\operatorname{tg} \hat{\alpha}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \hat{\alpha})^2}} \quad \text{или} \quad \cos \hat{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \hat{\alpha})^2}},$$

после подстановки которых возникает квадратное уравнение относительно неизвестного собственного дрейфа ω_{n3}^B

$$\begin{aligned} \left(-\bar{b}_1 + [\mathbf{m}_{11}\mathbf{m}_{21}]|_1 \begin{bmatrix} \omega_{n1}^B \\ \omega_{n2}^B \end{bmatrix} + \mathbf{m}_{31}|_1 \omega_{n3}^B \right)^2 + \\ + \left(\bar{b}_2 - [\mathbf{m}_{12}\mathbf{m}_{22}]|_1 \begin{bmatrix} \omega_{n1}^B \\ \omega_{n2}^B \end{bmatrix} - \mathbf{m}_{32}|_1 \omega_{n3}^B \right)^2 = 1, \end{aligned}$$

что требует последующей проверки найденных неизвестных решений и выбора одного из них.

Решение уравнений относительно неизвестных собственных дрейфов и азимута по данным режима навигации. После уточнения дрейфов и азимута через некоторый промежуток времени следует повторить коррекцию. Однако теперь существует только РН. В этом случае для двух положений объекта возникает следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 + \bar{\omega}_{n1}^S|_1) + \sin \hat{\alpha}_0 = \bar{b}_1 \\ (\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{n2}^S|_1) - \cos \hat{\alpha}_0 = \bar{b}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

— для РН в остановке в 1-м положении;

$$\left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 + \bar{\omega}_{n1}^S|_2) + \sin \hat{\alpha}_0 = \bar{b}_3 \\ (\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{n2}^S|_2) - \cos \hat{\alpha}_0 = \bar{b}_4 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

— для РН в остановке во 2-м положении.

В этих уравнениях известными являются оценка угла азимута $\hat{\alpha}$ и параметры $\bar{b}_1, \bar{b}_2, \bar{b}_3, \bar{b}_4$ колебаний Шулера в двух положениях.

Преобразуем выражения (10) и (11), получим

$$\left. \begin{aligned} \bar{\omega}_{\text{п}1}^S|_2 - \bar{\omega}_{\text{п}1}^S|_1 &= \bar{b}_3 - \bar{b}_1 \\ \bar{\omega}_{\text{п}2}^S|_2 - \bar{\omega}_{\text{п}2}^S|_1 &= \bar{b}_4 - \bar{b}_2 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Введем соотношение для приведенного дрейфа относительно третьей оси

$$\hat{\omega}_{\text{п}3}^S|_1 = \mathbf{m}'_3|_1 \boldsymbol{\omega}_{\text{п}}^B = b_5 \quad \text{или} \quad \bar{\omega}_{\text{п}3}^S|_1 = \mathbf{m}'_3|_1 \bar{\boldsymbol{\omega}}_{\text{п}}^B = \bar{b}_5 \quad (13)$$

как дополнение к системе (12).

Теперь возникает замкнутая линейная система уравнений (12), (13) относительно вектора неизвестного собственного дрейфа БИНС $\boldsymbol{\omega}_{\text{п}}^B$. После нахождения вектора собственного дрейфа определяется уточненная оценка азимута из соотношений (10) или (11):

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha_0 &= -(\bar{b}_1 - \sin \hat{\alpha}_0 - \bar{\omega}_{\text{п}1}^S|_1) \\ \cos \alpha_0 &= \bar{b}_2 + \cos \hat{\alpha}_0 - \bar{\omega}_{\text{п}2}^S|_1 \end{aligned} \right\},$$

$$\text{tg } \alpha_0 = \frac{\sin \alpha_0}{\cos \alpha_0} = \frac{-(\bar{b}_1 - \sin \hat{\alpha}_0 - \bar{\omega}_{\text{п}1}^S|_1)}{(\bar{b}_2 + \cos \hat{\alpha}_0 - \bar{\omega}_{\text{п}2}^S|_1)}.$$

Вариант ZUPT-2. Для данного варианта ZUPT предполагается, что оценка текущего азимута является достаточно точной $\alpha_0 = \hat{\alpha}_0$ и поэтому требуется оценить только собственные дрейфы ВИУС.

Собственные дрейфы ВИУС можно оценить в РН при остановленном в некотором положении ПО. Здесь возникает следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (-\sin \alpha_0 + \bar{\omega}_{\text{п}1}^S) + \sin \hat{\alpha}_0 &= \bar{b}_1 \\ (\cos \alpha_0 + \bar{\omega}_{\text{п}2}^S) - \cos \hat{\alpha}_0 &= \bar{b}_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \bar{\omega}_{\text{п}1}^S &= \bar{b}_1 \\ \bar{\omega}_{\text{п}2}^S &= \bar{b}_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

— для РН в остановке,

$$\hat{\omega}_{\text{п}3}^S = \mathbf{m}'_3 \boldsymbol{\omega}_{\text{п}}^B = b_5 \quad \text{или} \quad \bar{\omega}_{\text{п}3}^S = \mathbf{m}'_3 \bar{\boldsymbol{\omega}}_{\text{п}}^B = \bar{b}_5. \quad (15)$$

Система уравнений (14) и (15) является линейной и легко решается.

Моделирование режима ZUPT. Исходные данные для моделирования: шаг дискретности – 0,005 с (200 Гц); широта $\varphi = 60^\circ$; азимут $\alpha = 45^\circ$. Модели ВИУС и ВИЛУ – импульсные. Угловое положение объекта: углы тангажа и крена $\vartheta = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$. Колебания объекта отсутствуют. Значения дрейфов, принятые при моделировании (с^{-1}), следующие: $[10^{-7}, -10^{-7}, 10^{-7}]$. Дрейфы ВИУС определяются на временном интервале от 40 до 200 с (рис. 1).

После определения дрейфов происходит их компенсация (после 200 с). Результаты компенсации показаны на графиках, иллюстриру-

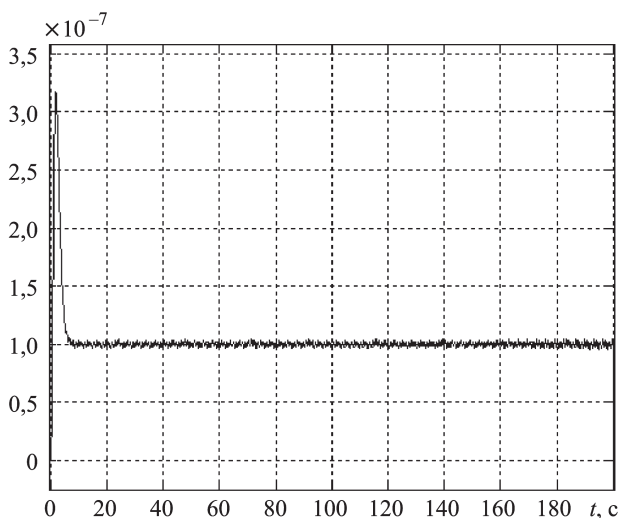


Рис. 1. Приведенные оценки дрейфов (с^{-1}) ВИУС по горизонтальным осям НСК

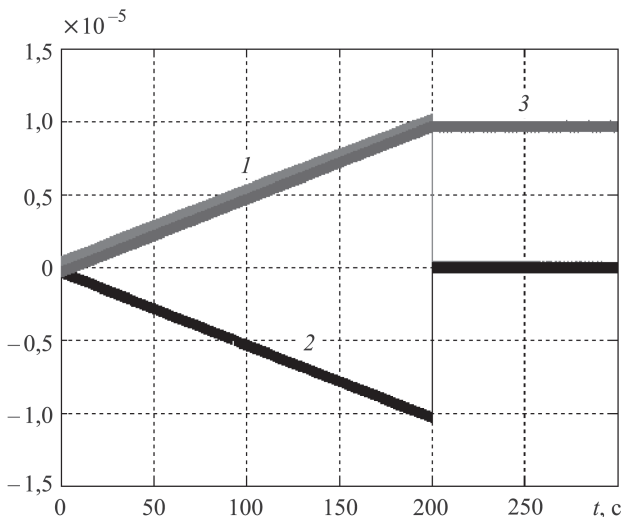


Рис. 2. Изменение углового положения объекта (векторная часть кватерниона)

ющих изменение кватерниона (векторная часть) углового положения ПО (рис. 2), изменение угла рыскания (рис. 3) и колебания Шулера по линейной скорости (две горизонтальные составляющие, рис. 4).

На рис. 5 показаны действующие возмущения для случая определения вертикального дрейфа при колеблющемся объекте, который находится в горизонте (углы тангажа и крена $\vartheta = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$). Модели ВИУС и ВИЛУ — импульсные. Широта $\varphi = 60^\circ$; азимут $\alpha = 45^\circ$. Оценки дрейфов в ССК: $1,065441178952939 \cdot 10^{-7}$ (6,5%); $-1,014019850490271 \cdot 10^{-7}$ (1,4%); $1,004983689103105 \cdot 10^{-7}$ (0,5%).

Рекомендации по применению режима ZUPT. Рассмотренные варианты реализации режима ZUPT позволяют дать вполне определенные рекомендации по его использованию.

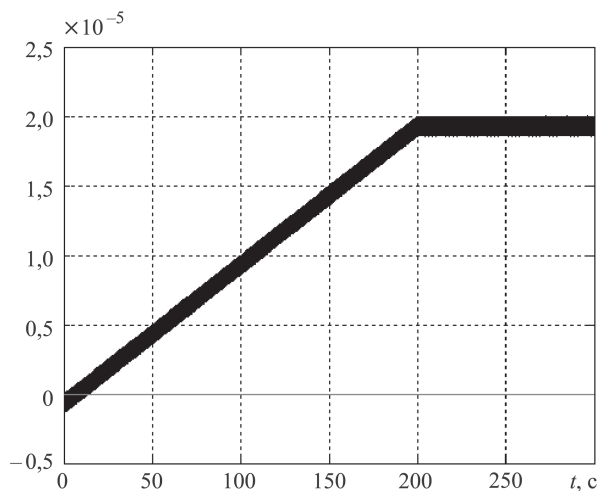


Рис. 3. Изменение угла рыскания (рад)

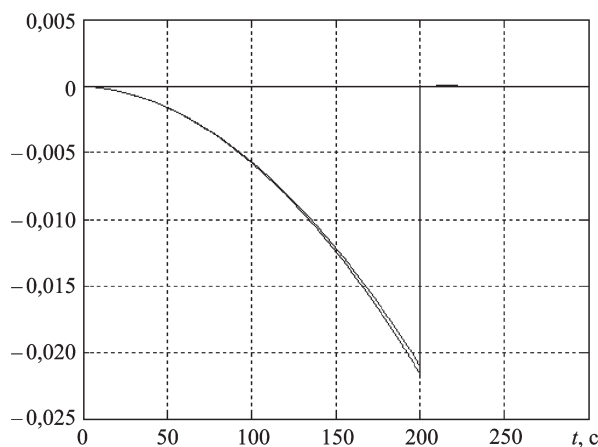


Рис. 4. Колебания Шулера по линейной скорости (м/с) в БИНС

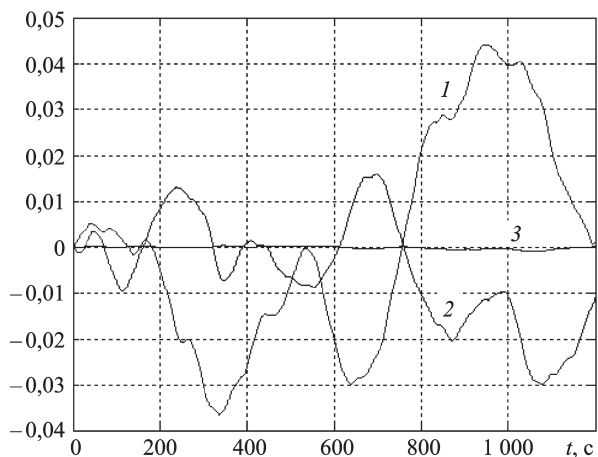


Рис. 5. Угловые колебания объекта (компоненты кватерниона ориентации)

При начальном старте ПО целесообразно использовать режим ZUPT-1, когда формируется система уравнений по двум различным угловым положениям ПО. Это обеспечивает получение хорошей начальной точности. В процессе движения, когда происходит компенсация вычисленных дрейфов, можно предположить, что характеристики точности БИНС поддерживаются на достаточно хорошем уровне. Поэтому в процессе движения используется режим ZUPT-2, когда формирование системы уравнений для дрейфов происходит только в одном угловом положении объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Savage P.G.* Strapdown Analytics / Published by: Strapdown Associates, Inc. Maple Plain, Minnesota, 2000. Part 1. 847 p.; Part 2. 723 p.
2. *Бабич О.А.* Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
3. *Гупалов В.И., Мочалов А.В., Боронахин А.М.* Инерциальные методы и средства определения параметров движения объектов. СПб.: Изд-во СПб-ГЭТУ “ЛЭТИ”, 2000. 84 с.
4. *Дмитриев С.П.* Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб: ГНЦ РФ — ЦНИИ “Электроприбор”, 1997. 208 с.
5. *Лобусов Е.С., Фомичев А.В.* Исследование режима ZUPT-коррекции для БИНС // Труды девятого междунар. симп. Интеллектуальные системы. М.: 2010. С. 514–519.

REFERENCES

- [1] *Savage P.G.* Strapdown Analytics. Minnesota, Strapdown Associates, Inc. Maple Plain, 2000. 847 p. (part 1), 723 p. (part 2).
- [2] *Babich O.A.* Information processing in navigational complex. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 512 p.
- [3] *Gupalov V.I., Mochalov A.V., Boronakhin A.M.* Inertsial’nye metody i sredstva opredeleniya parametrov dvizheniya ob’ektov [Inertial methods and techniques of parameters identification of objects motion]. SPb., SPb-GETU “LETI” Publ., 2000. 84 p.
- [4] *Dmitriev S.P.* Inertial methods in engineering geodesy. SPb., GNTs RF-TsNII “Elektropribor” Publ., 1997. 208 p.
- [5] *Lobusov E.S., Fomichev A.V.* Research of ZUPT-correction mode for BINS. *Tr. devyatogo mezhdunar. simp. “Intellektual’nye sistemy”* [Proc. 9th Int. Symp. “Intelligence Systems”], Moscow, 2010, pp. 514–519 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.01.2014

Лобусов Евгений Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области навигации и систем управления сложными динамическими объектами. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Lobusov E.S. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of navigation and control systems of complex dynamic objects. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Фомичёв Алексей Викторович — канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана, первый заместитель декана факультета “Информатика и системы управления”. Автор более 70 научных работ в области навигации и систем управления сложными динамическими объектами.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Fomichev A.V. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor, deputy head of “Automatic Control Systems” department, first deputy dean of “Informatics and Control Systems” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of navigation and control systems of complex dynamic objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.