

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 531.383

С. Г. Наумов

О ДЕМПФИРОВАНИИ ШУЛЕРОВСКИХ КОЛЕБАНИЙ АВТОНОМНЫХ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Рассматривается возможность применения схемы демпфирования бесплатформенных инерциальных навигационных систем с использованием сглаживающих фильтров и нелинейных элементов в каналах интегральной коррекции по тангажу и крену. Проверена работоспособность данной схемы методом математического моделирования работы навигационной системы в кватернионных параметрах. Повышена точность оценки ориентационных и навигационных параметров в 3–5 раз.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, схема демпфирования колебаний, кватернионы, тангаж, крен.

Abstract. The article considers the damping circuit for strapdown inertial navigation system with using smoothing filters and non-linear elements in channels of the integral correction on pitch and roll. Working capacity of the given circuit is tested by method of mathematical modeling of the functioning the navigation system in quaternion parameters. Accuracy of the estimation orientation and navigation parameters are increased in 3–5 times.

Keywords: strapdown inertial navigation system, circuit of the damping the fluctuations, quaternion, pitch, roll.

Введение

В настоящее время бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) находят широкое применение на различных подвижных объектах (ПО) для определения ориентационных и навигационных параметров. Одним из нежелательных моментов, свойственных автономной работе БИНС, является возникновение медленно меняющейся периодической ошибки. Неточность задания начальных условий на момент включения БИНС, а также некомпенсированные собственные погрешности векторных измерителей угловой скорости (гироскопов) и кажущегося ускорения (акселерометров) вызывают незатухающие колебания с периодом невозмущаемости (период Шулера) или близким к нему. Эти колебания создают погрешности в показаниях ориентации, скорости и координат. Поэтому БИНС представляют собой колебательные системы и при длительной работе нуждаются в демпфирующем устройстве.

Однако классическое демпфирование, вводимое в автономную инерциальную систему, кроме затухания колебаний, вносит и погрешности в пара-

метры, определяемые БИНС. Погрешности эти значительны и пренебрегать ими нельзя.

1 Постановка задачи

В работе [1] приведена схема автономного демпфирования каналов вертикали платформенной инерциальной навигационной системы с включением сглаживающих фильтров и нелинейных элементов, обеспечивающая более высокую точность построения вертикали и выработки скорости во время и после маневрирования объекта по сравнению с классическими схемами автономного демпфирования. В настоящей статье рассматриваются возможность и принцип применения данной схемы для демпфирования колебаний БИНС с периодом Шулера и проверка с помощью математического моделирования целесообразности использования этой схемы.

Для этого приведем сначала алгоритмы функционирования БИНС.

2 Алгоритмы работы БИНС

Введем следующие правые ортогональные системы координат (рис. 1, 2): ξ – инерциальная; η – азимутально-свободная горизонтная [2], ось $O\eta_2$ которой направлена по вертикали места, а оси $O\eta_1$ и $O\eta_3$ лежат в плоскости горизонта; X – система координат, связанная с ПО, причем OX_1 – продольная, OX_2 – нормальная, OX_3 – поперечная, направленная на правый борт ПО. Полагаем, что т. O совпадает с центром масс ПО; ζ – географическая сопровождающая система координат; ψ , θ , γ – углы рыскания, тангажа и крена; λ , φ – углы географических долготы и широты места; R – радиус Земли, принятой за сферу; O_3 – центр Земли; $\bar{\omega}_{\eta_i}$, \bar{W}_{η_i} ($i = \overline{1,3}$) – компоненты переносной угловой скорости системы координат η и кажущегося ускорения точки O по ее осям; $\bar{\omega}_{X_i}$, \bar{W}_{X_i} ($i = \overline{1,3}$) – компоненты переносной угловой скорости ПО и кажущегося ускорения точки O по осям OX_i ($i = \overline{1,3}$), соответственно.

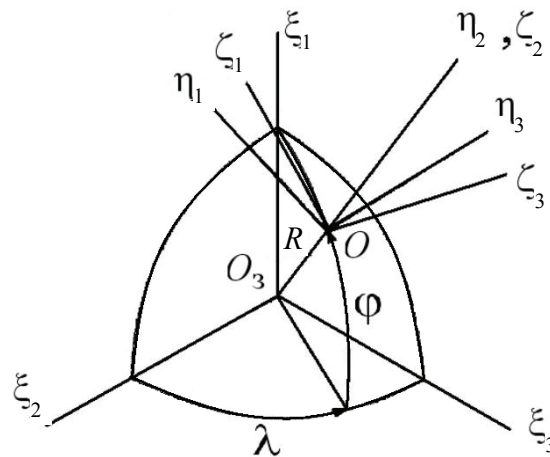


Рис. 1 Опорные системы координат

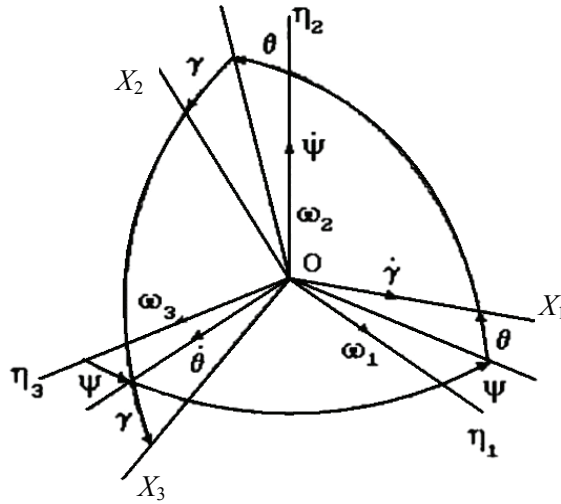


Рис. 2 Схема поворотов ПО

Взаимная ориентация введенных систем координат (базисов трехгранников) задается кватернионными параметрами в соответствии со следующей схемой:

$$X \xrightarrow{\frac{\psi, \theta, \gamma}{\bar{v}_0 - \bar{v}_3}} \eta \xrightarrow{\frac{\hat{\lambda}, \hat{\varphi}}{\hat{\varepsilon}_0 - \hat{\varepsilon}_3}} \xi. \quad (1)$$

На основе приведенной схемы поворотов (1) с помощью ввода членов коррекции в уравнения движения в кватернионных параметрах получают следующие алгоритмы с настройкой на частоту Шулера, описывающие движение БИНС [3]:

$$\begin{aligned} \left[\bar{W}_{\eta_1} \ \bar{W}_{\eta_2} \ \bar{W}_{\eta_3} \right]^T &= \bar{A}^T \left[\bar{W}_{X1} \ \bar{W}_{X2} \ \bar{W}_{X3} \right]^T; \\ \left[\hat{\omega}_{\eta_1} \ \hat{\omega}_{\eta_2} \ \hat{\omega}_{\eta_3} \right]^T &= \hat{A}^T \left[\hat{\omega}_{X1} \ \hat{\omega}_{X2} \ \hat{\omega}_{X3} \right]^T; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{v}_0^2 + \hat{v}_1^2 - \hat{v}_2^2 - \hat{v}_3^2 & 2(\hat{v}_0\hat{v}_3 + \hat{v}_1\hat{v}_2) & 2(\hat{v}_1\hat{v}_3 - \hat{v}_0\hat{v}_2) \\ 2(\hat{v}_1\hat{v}_2 - \hat{v}_0\hat{v}_3) & \hat{v}_0^2 + \hat{v}_2^2 - \hat{v}_1^2 - \hat{v}_3^2 & 2(\hat{v}_0\hat{v}_1 + \hat{v}_2\hat{v}_3) \\ 2(\hat{v}_0\hat{v}_2 + \hat{v}_1\hat{v}_3) & 2(\hat{v}_2\hat{v}_3 - \hat{v}_0\hat{v}_1) & \hat{v}_0^2 + \hat{v}_3^2 - \hat{v}_1^2 - \hat{v}_2^2 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} 2\dot{\hat{v}}_0 &= -\hat{v}_1(\hat{\omega}_{\eta_1} + \omega_{\eta_1}^k) - \hat{v}_2(\hat{\omega}_{\eta_2} + \omega_{\eta_2}^k) - \hat{v}_3(\hat{\omega}_{\eta_3} + \omega_{\eta_3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_0; \\ 2\dot{\hat{v}}_1 &= \hat{v}_0(\hat{\omega}_{\eta_1} + \omega_{\eta_1}^k) + \hat{v}_3(\hat{\omega}_{\eta_2} + \omega_{\eta_2}^k) - \hat{v}_2(\hat{\omega}_{\eta_3} + \omega_{\eta_3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_1; \\ 2\dot{\hat{v}}_2 &= -\hat{v}_3(\hat{\omega}_{\eta_1} + \omega_{\eta_1}^k) + \hat{v}_0(\hat{\omega}_{\eta_2} + \omega_{\eta_2}^k) + \hat{v}_1(\hat{\omega}_{\eta_3} + \omega_{\eta_3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_2; \\ 2\dot{\hat{v}}_3 &= \hat{v}_2(\hat{\omega}_{\eta_1} + \omega_{\eta_1}^k) - \hat{v}_1(\hat{\omega}_{\eta_2} + \omega_{\eta_2}^k) + \hat{v}_0(\hat{\omega}_{\eta_3} + \omega_{\eta_3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_3; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{v}^2 = \hat{v}_0^2 + \hat{v}_1^2 + \hat{v}_2^2 + \hat{v}_3^2; \quad (5)$$

$$\omega_{\eta_1}^k = -\frac{1}{R} \int_{t_0}^t (\widehat{W}_{\eta_3} - \widehat{\bar{W}}_{\eta_3}) d\tau - U \sqrt{1 - 4(\hat{\varepsilon}_1 \hat{\varepsilon}_2 - \hat{\varepsilon}_0 \hat{\varepsilon}_3)^2}; \quad (6)$$

$$\omega_{\eta_3}^k = \frac{1}{R} \int_{t_0}^t (\widehat{W}_{\eta_1} - \widehat{\bar{W}}_{\eta_1}) d\tau; \quad (7)$$

$$\omega_{\zeta_1}^k = \omega_{\eta_1}^k \cos \hat{\psi} + \omega_{\eta_3}^k \sin \hat{\psi}; \quad \omega_{\zeta_3}^k = -\omega_{\eta_1}^k \sin \hat{\psi} + \omega_{\eta_3}^k \cos \hat{\psi}; \quad (8)$$

$$\omega_{\zeta_2}^k = \omega_{\zeta_1}^k \frac{2(\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_0 \varepsilon_3)}{[1 - 4(\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_0 \varepsilon_3)^2]^{1/2}}; \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\hat{v}_{\zeta_1}}{dt} &= \widehat{W}_{\zeta_1} - \widehat{\bar{W}}_{\zeta_1} = \widehat{W}_{\zeta_1} - 2\hat{v}_{\zeta_3} U \sin \hat{\varphi} - \frac{\hat{v}_{\zeta_3}^2}{R} \operatorname{tg} \hat{\varphi} - \frac{\hat{v}_{\zeta_1} \hat{v}_{\zeta_2}}{R}; \\ \frac{d\hat{v}_{\zeta_2}}{dt} &= \widehat{W}_{\zeta_2} - \widehat{\bar{W}}_{\zeta_2} = \widehat{W}_{\zeta_2} + \frac{(\hat{v}_{\zeta_1}^2 + \hat{v}_{\zeta_3}^2)}{R} + 2U \hat{v}_{\zeta_3} \cos \hat{\varphi} - g'; \\ \frac{d\hat{v}_{\zeta_3}}{dt} &= \widehat{W}_{\zeta_3} - \widehat{\bar{W}}_{\zeta_3} = \widehat{W}_{\zeta_3} + 2U \hat{v}_{\zeta_1} \sin \hat{\varphi} - U \hat{v}_{\zeta_2} \cos \hat{\varphi} - \frac{\hat{v}_{\zeta_3} (\hat{v}_{\zeta_2} - \hat{v}_{\zeta_1} \operatorname{tg} \hat{\varphi})}{R}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

где $\hat{\omega}_{Xi}$, \widehat{W}_{Xi} – оценки компонентов угловой скорости и кажущегося ускорения в базисе X , полученные с гироскопов и акселерометров; $\hat{\omega}_{\eta_i}$, \widehat{W}_{η_i} – оценки компонентов угловой скорости и кажущегося ускорения в базисе η ; $\rho = 1$ – коэффициент нормировки кватерниона \hat{v} ; $\omega_{\eta_1}^k$, $\omega_{\eta_2}^k$, $\omega_{\eta_3}^k$ – корректирующие члены; \hat{A} – матрица кватернионов; $\widehat{\bar{W}}_{\eta_1}$, $\widehat{\bar{W}}_{\eta_3}$ – поправки, состоящие из перекрестных ускорений; $\hat{v}_0 - \hat{v}_3$ – кватернионы ориентации; $\hat{\varepsilon}_0 - \hat{\varepsilon}_3$ – кватернионы навигации; t – текущее время.

По полученным оценкам кватернионных параметров ориентации рассчитываются углы Эйлера-Крылова, необходимые для качественных оценок, по следующим формулам:

$$\hat{\psi} = \operatorname{arctg} \left(\frac{2(\hat{v}_0 \hat{v}_2 - \hat{v}_1 \hat{v}_3)}{\hat{v}_0^2 + \hat{v}_1^2 - \hat{v}_2^2 - \hat{v}_3^2} \right), \quad \hat{\theta} = \operatorname{arctg} \left(\frac{2(\hat{v}_0 \hat{v}_3 + \hat{v}_1 \hat{v}_2)}{\sqrt{1 - 4(\hat{v}_0 \hat{v}_3 + \hat{v}_1 \hat{v}_2)^2}} \right),$$

$$\hat{\gamma} = \operatorname{arctg} \left(\frac{2(\hat{v}_0 \hat{v}_1 - \hat{v}_2 \hat{v}_3)}{\hat{v}_0^2 + \hat{v}_2^2 - \hat{v}_1^2 - \hat{v}_3^2} \right). \quad (11)$$

В алгоритмах по уравнениям (2)–(10) функционирует только шулеровская интегральная коррекция (6), (7).

Решению навигационной задачи соответствуют следующие уравнения [3]:

$$\begin{aligned} 2\dot{\hat{\epsilon}}_0 &= \hat{\epsilon}_1\omega_{\zeta 1}^k + \hat{\epsilon}_2\omega_{\zeta 2}^k + \hat{\epsilon}_3\omega_{\zeta 3}^k; \\ 2\dot{\hat{\epsilon}}_1 &= -\hat{\epsilon}_0\omega_{\zeta 1}^k - \hat{\epsilon}_2\omega_{\zeta 3}^k + \hat{\epsilon}_3\omega_{\zeta 2}^k; \\ 2\dot{\hat{\epsilon}}_2 &= -\hat{\epsilon}_0\omega_{\zeta 2}^k + \hat{\epsilon}_1\omega_{\zeta 3}^k - \hat{\epsilon}_3\omega_{\zeta 1}^k; \\ 2\dot{\hat{\epsilon}}_3 &= -\hat{\epsilon}_0\omega_{\zeta 3}^k - \hat{\epsilon}_1\omega_{\zeta 2}^k + \hat{\epsilon}_2\omega_{\zeta 1}^k. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь также возможны качественные оценки навигационных параметров по следующим формулам:

$$\hat{\varphi} = \arctg \left(\frac{2(\hat{\epsilon}_1\hat{\epsilon}_2 - \hat{\epsilon}_0\hat{\epsilon}_3)}{\sqrt{1 - 4(\hat{\epsilon}_1\hat{\epsilon}_2 - \hat{\epsilon}_0\hat{\epsilon}_3)^2}} \right); \quad \hat{\lambda} = \arctg \left(\frac{2(\hat{\epsilon}_0\hat{\epsilon}_1 + \hat{\epsilon}_2\hat{\epsilon}_3)}{\hat{\epsilon}_0^2 + \hat{\epsilon}_2^2 - \hat{\epsilon}_1^2 - \hat{\epsilon}_3^2} \right) - Ut. \quad (13)$$

Таким образом, можно сформировать структурную схему работы БИНС в кватернионных алгоритмах по уравнениям (2)–(10), (12) (рис. 3).

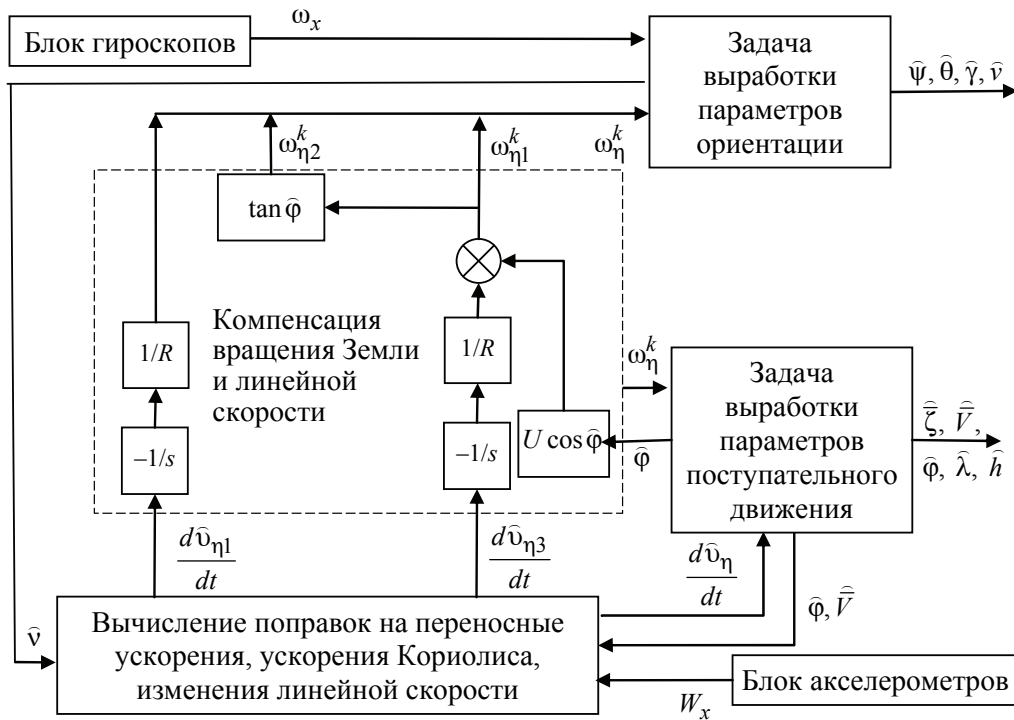


Рис. 3 Структурная схема БИНС в кватернионных параметрах

3 Введение демпфирования БИНС

Теперь введем схему демпфирования шулеровских колебаний БИНС. На рис. 4 представлена структурная схема БИНС с введенным демпфированием вертикальных каналов (с использованием схемы для платформенных ИНС из [1]).

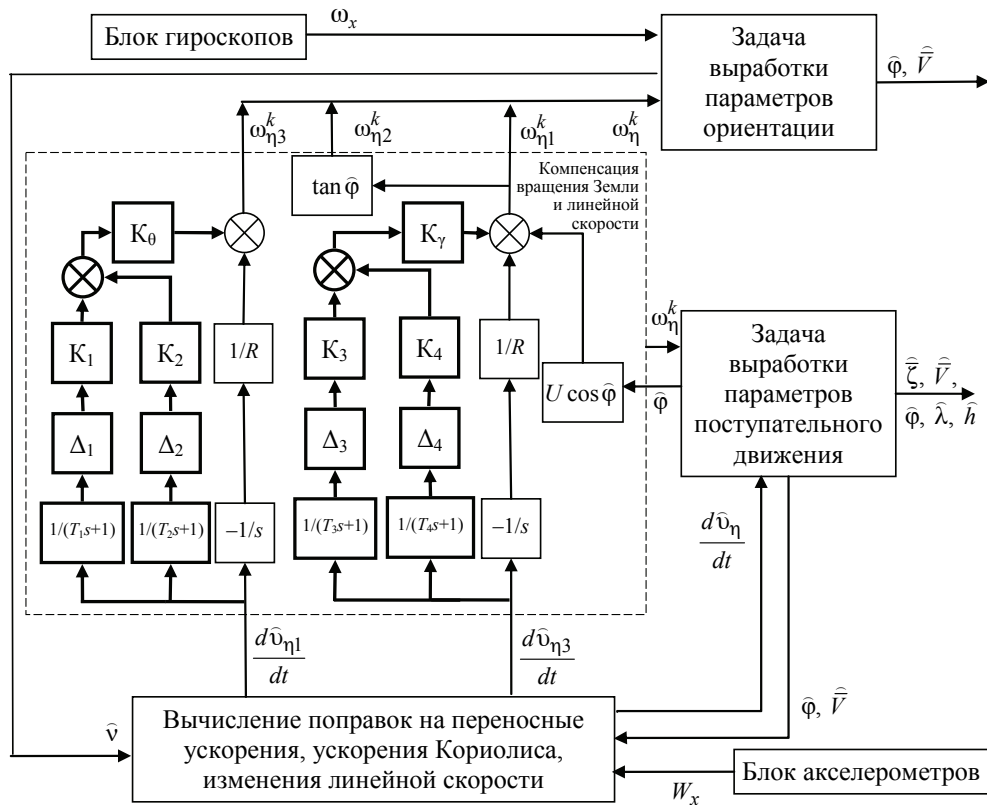


Рис. 4 Структурная схема БИНС с введенным демпфированием

Жирными линиями на схеме выделены контуры демпфирования по тангажу и крену, введенные в линию оценок линейных ускорений объекта в свободной горизонтной системе координат $\left(\frac{d\hat{v}_{\eta 1}}{dt}, \frac{d\hat{v}_{\eta 3}}{dt} \right)$. Каждый контур

включает в себя по два канала, состоящих из сглаживающего фильтра $\frac{1}{Ts+1}$ ($T_1 - T_4$ – постоянные времени), нелинейного элемента ($\Delta_1 - \Delta_4$ – пороги ограничения) и усилителя ($K_1 - K_4$ – коэффициенты усиления). Для контуров тангажа и крена введены также усилители $-K_0, K_\gamma$ соответственно. Сигналы контуров демпфирования подаются совместно с интегральной коррекцией по тангажу и крену в алгоритм выработки ориентации ПО для компенсации вращения Земли и линейной скорости ПО.

В БИНС, в отличие от реализации схемы демпфирования на платформенной инерциальной навигационной системе, в корректирующие члены в дополнение к интегральной коррекции вводится сглаженный фильтром и ограниченный нелинейным элементом сигнал. При отсутствии маневра будет иметь место обычная позиционная коррекция.

4 Математическое моделирование работы БИНС

При математическом моделировании была проверена работоспособность кватернионных алгоритмов БИНС с настройкой на частоту Шулера и

введенным демпфированием по каналам вертикали, оценены погрешности углов ориентации и навигационных параметров с учетом ошибок гироскопов и акселерометров, а также влияние введения демпфирования на точностные параметры БИНС.

Для решения этих задач были заданы режимы движения подвижного объекта в географической системе координат $O\zeta_1\zeta_2\zeta_3$. В табл. 1 приведены параметры поступательного движения (все действия ускорений сопряжены по гиперболическому тангенсу).

Таблица 1

Параметры поступательного движения

Интервал времени, с	Скорость, м/с	Ускорение
0...1490	$v_{\zeta_1} = v_{\zeta_2} = v_{\zeta_3} = 0$	$\dot{v}_{\zeta_1} = \dot{v}_{\zeta_2} = \dot{v}_{\zeta_3} = 0$
1490...1530	$v_{\zeta_1} = \dot{v}_{\zeta_1}(t-1490)$	$\dot{v}_{\zeta_1}(t \in 1490...1510) = 0,5(htg(t-1500)+1)$ $\dot{v}_{\zeta_1}(t \in 1510...1530) = 0,5(-htg(t-1520)+1)$
1530...5590	$v_{\zeta_1} = 20$	$\dot{v}_{\zeta_1} = 0$
2490...2530	$v_{\zeta_3} = \dot{v}_{\zeta_3}(t-2490)$	$\dot{v}_{\zeta_3}(t \in 2490...2510) = 0,5(htg(t-2500)+1)$ $\dot{v}_{\zeta_3}(t \in 2510...2530) = 0,5(-htg(t-2520)+1)$
2530...6590	$v_{\zeta_3} = 20$	$\dot{v}_{\zeta_3} = 0$
5590...5630	$v_{\zeta_1} = \dot{v}_{\zeta_1}(t-1590)$	$\dot{v}_{\zeta_1}(t \in 1590...1610) = -1(htg(t-1600)+1)$ $\dot{v}_{\zeta_1}(t \in 1610...1630) = -1(-htg(t-1620)+1)$
5630...10000	$v_{\zeta_1} = -20$	$\dot{v}_{\zeta_1} = 0$
6590...6630	$v_{\zeta_3} = \dot{v}_{\zeta_3}(t-2590)$	$\dot{v}_{\zeta_3}(t \in 2590...2610) = -1(htg(t-2600)+1)$ $\dot{v}_{\zeta_3}(t \in 2610...2630) = -1(-htg(t-2620)+1)$
6630...10000	$v_{\zeta_3} = -20$	$\dot{v}_{\zeta_3} = 0$

Качка ПО включается при $t = 1000$ с и действует до окончания движения (также сопряжена по гиперболическому тангенсу):

$$\Psi = \Psi_a \sin(\omega_\Psi); \theta = \theta_a \sin(\omega_\theta); \gamma = \gamma_a \sin(\omega_\gamma);$$

$$\Psi_a = \theta_a = \gamma_a = 0,1 \text{ рад}; \omega_\Psi = 0,628 \text{ рад/с}; \omega_\theta = 0,314 \text{ рад/с};$$

$$\omega_\gamma = 0,1256 \text{ рад/с}; \Psi_a(t \in 990...1010) = 0,5(htg(t-1000)+1);$$

$$\theta_a(t \in 990...1010) = 0,5(htg(t-1000)+1);$$

$$\gamma_a(t \in 990...1010) = 0,5(htg(t-1000)+1).$$

При моделировании выбраны следующие параметры:

$$\Delta_1 = \Delta_3 = 0,001 \text{ м/с}^2; \Delta_2 = \Delta_4 = 0,0005 \text{ м/с}^2; T_1 = T_3 = 0,1 \text{ с}; T_2 = T_4 = 0,2 \text{ с};$$

$$K_1 = K_3 = 1; K_2 = K_4 = 2; K_\theta = K_\gamma = 20000/R = 0,0031.$$

Время моделирования 10000 с, шаг интегрирования 0,01 с.

Погрешности датчиков первичной информации задавались следующим образом:

$$\widehat{\omega}_{Xi} = \omega_{Xi} + \Delta\omega_i + \sigma_{\omega_i}; \widehat{W}_{Xi} = W_{Xi} + \Delta W_i + \sigma_{W_i};$$

$$\Delta\dot{\omega}_i = -\Delta\omega_i / \tau_{\omega_i} + \sigma_{\Delta\omega_i}; \Delta\dot{W}_i = -\Delta W_i / \tau_{W_i} + \sigma_{\Delta W_i},$$

где $i = 1, 2, 3$; $\Delta\omega_i, \Delta W_i$ – дрейфы гироскопов и сдвиги нулей акселерометров; $\sigma_{\omega_i}, \sigma_{W_i}$ – уровень случайного шума, характеризующий смещение нулей от пуска к пуску; $\tau_{\omega_i}, \tau_{W_i}$ – интервалы корреляции сдвигов нулей; $\sigma_{\Delta\omega_i}, \sigma_{\Delta W_i}$ – уровень случайного шума, характеризующий смещение нулей в пуске; $\sigma_{\omega_i} = 9,69 \cdot 10^{-9}$ рад/с, $\tau_{\omega_i} = 600$ с, $\sigma_{\Delta\omega_i} = 4,85 \cdot 10^{-8}$ рад/с², $\sigma_{W_i} = 2 \cdot 10^{-6}$ м/с², $\tau_{W_i} = 7200$ с, $\sigma_{\Delta W_i} = 8 \cdot 10^{-6}$ м/с³.

Это составило для гироскопа дрейф $\approx 0,03$ град/ч и шум $\approx 0,01$ град/ч, для акселерометра сдвиг нуля $\approx 10^{-4}$ м/с² и шум $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ м/с².

На рис. 5–7 представлены графики изменения во времени погрешностей углов курса (определялся исходя из интегральных членов коррекции), азимута, тангажа и крена, скоростей и координат для работы БИНС в кватернионных параметрах без демпфирования и с демпфированием колебаний Шулера. Нетрудно видеть, что в БИНС без демпфирования совершаются колебания с периодом Шулера, характер которых не изменяется в моменты действия линейного ускорения (по табл. 1). Этот результат подтверждает теоретическую предпосылку об эффективности условия невозмущаемости БИНС к действию линейных ускорений. Для БИНС с демпфированием характерно уменьшение погрешностей в 3–5 раз по большей части параметров, кроме азимута (табл. 2). Отсутствие значительного сокращения погрешности угла азимута объясняется тем, что контуры демпфирования были введены только по углу тангажа и крена. Уменьшение погрешностей по углам вертикали отразилось на определении курса, скоростей и местоположения.

Таблица 2

Погрешности определения параметров движения

Параметр	$\Delta\psi$, рад	$\Delta\psi$, рад	$\Delta\theta$, рад	$\Delta\gamma$, рад	ΔV_1 , м/с	ΔV_2 , м/с	ΔV_3 , м/с	$\Delta\zeta_1$, м	$\Delta\zeta_2$, м	$\Delta\zeta_3$, м
	погрешность				погрешности					
	курса	азимута	тангажа	крена	определения скоростей			определения координат		
Без демпфирования	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,9	0,18	1,7	1600	700	3100
С демпфированием	$6 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,08	0,11	0,17	300	600	750

Из рис. 5 видно, что БИНС с применением демпфирования уже не является невозмущаемой – система реагирует рывком на действия ускорений. Однако точность системы в этом случае значительно повышается.

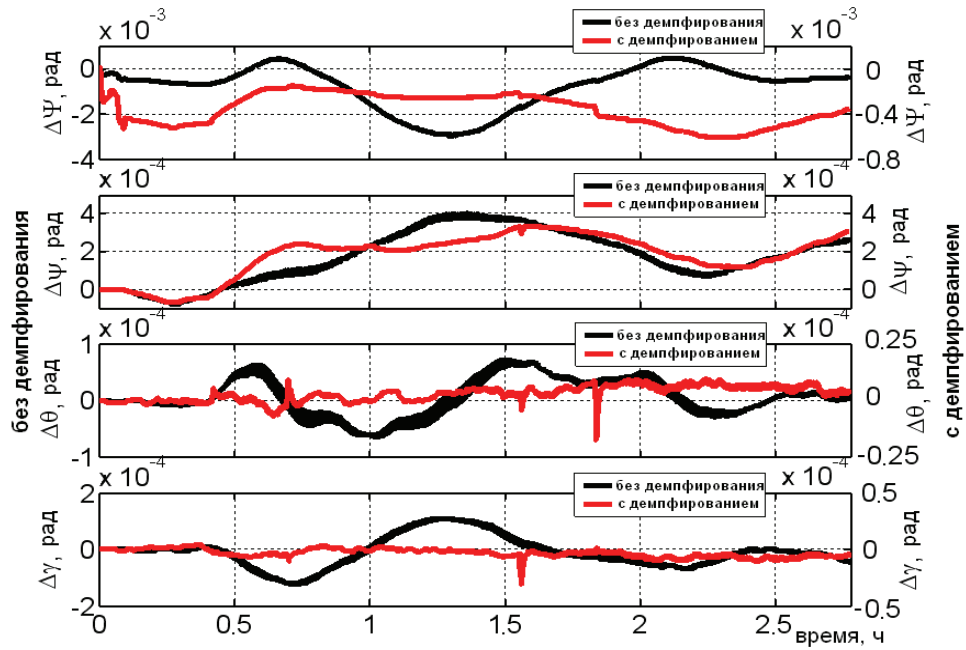


Рис. 5 Погрешности определения параметров ориентации с помощью БИНС без демпфирования и с демпфированием

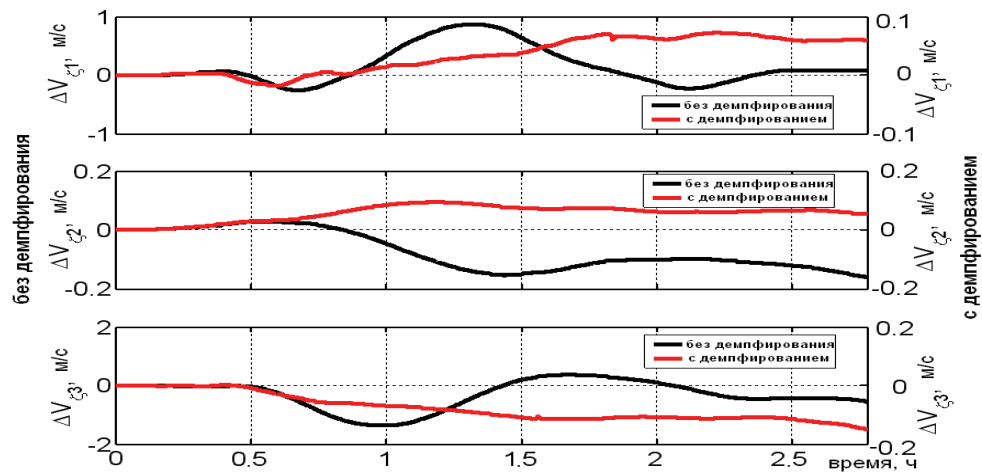


Рис. 6 Погрешности определения скоростей с помощью БИНС без демпфирования и с демпфированием

Заключение

Проведенное математическое моделирование работы БИНС в кватернионных параметрах с применением схемы демпфирования шулеровских колебаний в каналах вертикали подтвердило возможность использования сглаживающих фильтров и нелинейных элементов для уменьшения погрешностей выработки ориентационных и навигационных параметров БИНС.

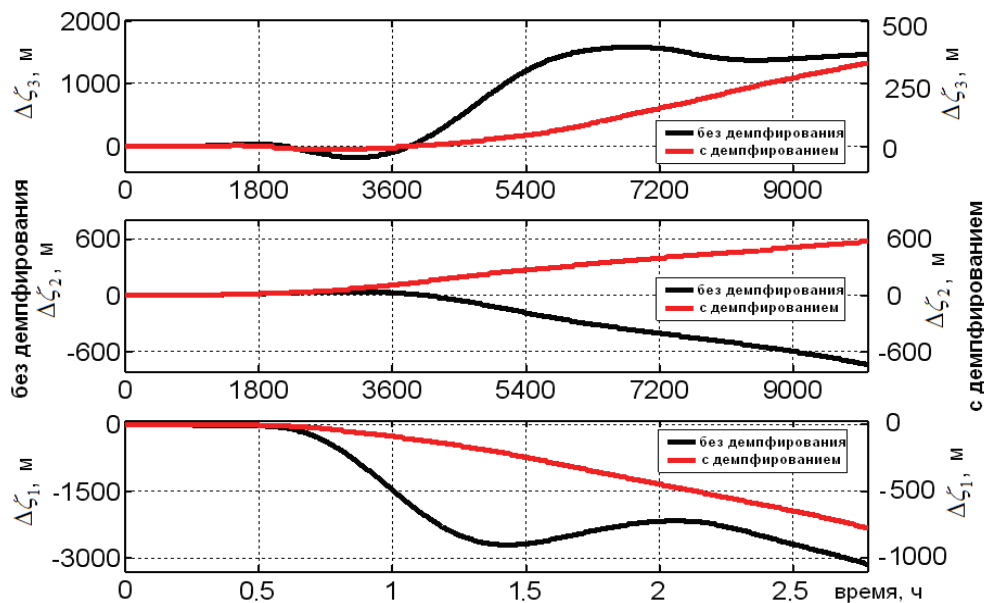


Рис. 7 Погрешности определения координат с помощью БИНС без демпфирования и с демпфированием

Список литературы

1. **Одинцов, А. А.** Об одной схеме автономного демпфирования инерциальных навигационных систем / А. А. Одинцов, В. Б. Васильева, Ю. Е. Наумов // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 1. – С. 33–42.
2. **Плотников, П. К.** Элементы теории работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации / П. К. Плотников // Гироскопия и навигация. – 1999. – № 3. – С. 23–35.
3. **Плотников, П. К.** Применение кватернионных алгоритмов в бесплатформенных инерциальных системах ориентации и локальной навигации / П. К. Плотников, Ю. В. Чеботаревский, А. А. Большаков, В. Б. Никишин // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 10. – С. 21–31.

Наумов Сергей Геннадьевич
аспирант, Саратовский государственный
технический университет

Naumov Sergey Gennadievich
Postgraduate student,
Saratov State Technical University

УДК 531.383

Наумов, С. Г.

О демпфировании шулеровских колебаний автономных бесплатформенных инерциальных навигационных систем / С. Г. Наумов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 2 (10). – С. 78–87.