

УДК 531.383

О. Л. Коломієць, В. О. Митрошин, Т. П. Оніщенко, О. В. Прохорчук

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОХИБОК ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ АЛГОРИТМІВ

### Вступ

Підвищення точності та надійності сучасних систем орієнтації та навігації є важливою і актуальною задачею сьогодення, особливо при створенні безплатформених інерціально-супутникових інтегрованих систем, що входять до складу систем керування безпілотних літальних апаратів. Пошук ефективних алгоритмів обробки первинної інформації чутливих елементів таких інтегрованих навігаційних систем проводиться багатьма колективами вітчизняних та закордонних науковців [1, 2, 3]. При створенні інтегрованих навігаційних систем, окрім класичних алгоритмів оцінювання калманівського типу [4–6], все частіше використовуються сучасні методи обробки інформації, такі як нейромережеві алгоритми та методи штучного інтелекту [7, 8].

### Постановка задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження можливості використання нейромережевих алгоритмів для підвищення точності та надійності визначення координат та кутової орієнтації рухомого об'єкта інтегрованими навігаційними системи, побудованими на основі безплатформених інерціальних навігаційних систем (БІНС) та супутникових навігаційних систем (СНС).

### Інтегрована система орієнтації та навігації

Розглянемо роботи БІНС, вважаючи, що початкова виставка і калібрування були вже проведені з необхідною точністю, а похибки чутливих елементів (ЧЕ) БІНС  $\Delta a_i$ ,  $\Delta \omega_i$  ( $i=x, y, z$ ) можна записати у вигляді [1, 2]:

$$\Delta a_i = m_{ai} + \eta_{ai}(t) + \hat{m}_{ai}, \quad \Delta \omega_i = m_{\omega i} + \eta_{\omega i}(t) + \hat{m}_{\omega i}, \quad (1)$$

де  $m_{ai}$ ,  $m_{\omega i}$  – повільно мінливі випадкові складові зсувів нулів акселерометрів і дрейфів датчиків кутової швидкості (ДКШ), побудованих на динамічно настроюваних гіроскопах (ДНГ);  $\eta_{ai}(t)$ ,  $\eta_{\omega i}(t)$  – шуми виміру акселерометрів і ДКШ;  $\hat{m}_{ai}$  – сигнали, що можуть вироблятися системою

## Прилади і методи контролю

для компенсації зсуву нулів акселерометрів;  $\hat{m}_{\omega i}$  – сигнали, що можуть вироблятися системою для компенсації постійних складових дрейфів ДКШ.

Усі повільно мінливі випадкові складові похибок ЧЕ БНС апроксимуємо експоненто-корельованими випадковими процесами, що описуються наступними диференціальними рівняннями:

$$\dot{m}_{ai} = -\tau_{ai}^{-1} m_{ai} + \xi_{ai}(t); \quad \dot{m}_{\omega i} = -\tau_{\omega i}^{-1} m_{\omega i} + \xi_{\omega i}(t), \quad (2)$$

де  $\tau_i$  – інтервали кореляції відповідних випадкових процесів;

$\xi_{ai}(t), \xi_{\omega i}(t)$  – породжуючі білі шуми.

Динаміка будь-якої лінійної системи може бути описана лінійними диференціальними рівняннями, у загальному випадку – із змінними у часі коефіцієнтами. Такі рівняння можна звести до системи з  $n$  диференціальних рівнянь у матричному вигляді:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + G(t)W(t), \quad (3)$$

де  $X(t)$  – вектор стану системи (давача);  $U(t)$  – вектор відомих вхідних впливів (у тому числі сигналів керування);  $W(t)$  – вектор випадкових вхідних впливів;  $A(t), G(t), B(t)$  – матриці, які називаються відповідно матрицею стану, матрицею керування і матрицею вхідних впливів, і утворені з відповідних коефіцієнтів диференціальних рівнянь першого порядку, що описують динаміку системи.

У вектор стану  $X(t)$ , що описує динаміку інтегрованої системи, входять 15 компонентів – похибки БНС і її чутливих елементів, що можуть змінюватися під час роботи системи:

$$X = \left[ \Delta\xi \ \Delta\eta \ \Delta\zeta \ \Delta V_\xi \ \Delta V_\eta \ \Delta V_\zeta \ \Delta\varphi_x \ \Delta\varphi_y \ \Delta\varphi_z \ m_{ax} \ m_{ay} \ m_{az} \ m_{\omega x} \ m_{\omega y} \ m_{\omega z} \right]^T, \quad (4)$$

де  $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$  – похибки визначення координат об'єкта;  $\Delta V_\xi, \Delta V_\eta, \Delta V_\zeta$  – похибки визначення швидкості об'єкта;  $\Delta\varphi_x, \Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z$  – похибки визначення кутової орієнтації об'єкта.

Вектор керування  $U(t)$  і вектор випадкових вхідних збурень  $W(t)$  сформуємо відповідно до рівнянь похибок (1):

$$U(t) = \left[ \hat{m}_{ax} \ \hat{m}_{ay} \ \hat{m}_{az} \ \hat{m}_{\omega x} \ \hat{m}_{\omega y} \ \hat{m}_{\omega z} \right]^T \quad (5)$$

$$W = \left[ \eta_{ax} \ \eta_{ay} \ \eta_{az} \ \eta_{\omega x} \ \eta_{\omega y} \ \eta_{\omega z} \ \xi_{ax}(t) \ \xi_{ay}(t) \ \xi_{az}(t) \ \xi_{\omega x}(t) \ \xi_{\omega y}(t) \ \xi_{\omega z}(t) \right]^T \quad (6)$$

Матриці коефіцієнтів  $A, G, B$  можна записати в блочному вигляді [1] (блоки розміром  $3 \times 3$ ):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ G_{mi} & 0 & A_i & B_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_m \\ 0 & 0 & 0 & -T_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_\omega \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_m & 0 \\ 0 & B_m \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & a_z & -a_y \\ -a_z & 0 & a_x \\ a_y & -a_x & 0 \end{bmatrix}, G_{mi} = \begin{bmatrix} \varepsilon \cdot \xi^2 - v^2 & \varepsilon \cdot \xi \cdot \eta & \varepsilon \cdot \xi \cdot \zeta \\ \varepsilon \cdot \eta \cdot \xi & \varepsilon \cdot \eta^2 - v^2 & \varepsilon \cdot \eta \cdot \zeta \\ \varepsilon \cdot \zeta \cdot \xi & \varepsilon \cdot \zeta \cdot \eta & \varepsilon \cdot \zeta^2 - v^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $\varepsilon = \frac{3 \cdot v^2}{r^2}$ ;  $T_a = \text{diag} [\tau_{ax}^{-1}, \tau_{ay}^{-1}, \tau_{az}^{-1}]$ ;  $T_\omega = \text{diag} [\tau_{\omega x}^{-1}, \tau_{\omega y}^{-1}, \tau_{\omega z}^{-1}]$ ;

$I$  – одинична матриця розміром  $3 \times 3$ .

Для оцінювання похибок БІНС, включених у вектор стану  $X(t)$  (4), використовуємо методику оптимального фільтра Калмана (ОФК) [6]. Вектор вимірів  $Y(t)$  для ОФК формується з різниці між координатами і швидкостями, визначеними за допомогою БІНС і приймача супутникової навігаційної системи (СНС):

$$Y(t) = C \cdot X(t) + V(t), \quad (8)$$

де  $V(t) = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6]^T$ , – вектор випадкових шумів вимірювань приймача СНС;

$$C = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де  $I$  – одинична матриця розміром  $3 \times 3$ .

З достатньою точністю можна покласти, що похибки навігаційних визначень приймача СНС  $v_i(t)$  ( $i=1 \dots 6$ ) є гаусівськими білими шумами [1].

У результаті аналізу матриці спостережності встановлено, що її ранг дорівнює 13, тобто повністю спостережними є 13 похибок з 15. Виключаючи окремі рядки і стовпці матриці  $A$ , що відповідають визначеним компонентам вектора стану (4), і перевіряючи після цього ранг матриці спостережності, встановлено, що не спостерігаються похибка визначення кутової орієнтації  $\Delta\varphi_z$  і дрейф ДКШ  $m_{\omega_i}$  навколо вертикальної осі.

### Використання нейромережевого алгоритму для ідентифікації похибок інтегрованої системи орієнтації та навігації

Рівняння похибок визначення просторової орієнтації об'єкта мають вигляді [1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\phi}_x \\ \Delta\dot{\phi}_y \\ \Delta\dot{\phi}_z \end{bmatrix} = B_m \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_{xo} \\ \Delta\omega_{yo} \\ \Delta\omega_{zo} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де  $B_m$  – матриця направляючих косинусів.

В [7, 8] показано, що зміна температури навколишнього середовища є основним зовнішнім чинником, що впливає на дрейфи ДКШ, побудованих на ДНГ, а взаємна корельованість, так званих, температурних дрейфів ДКШ дає можливість ідентифікувати, наприклад, дрейф ДКШ навколо вертикальної осі, вимірюючи дрейф ДКШ навколо горизонтальної осі. Це твердження дійсне і для похибок кутової орієнтації  $\Delta\phi_y$  і  $\Delta\phi_z$ , таким чином залежність між цими двома випадковими процесами робить доцільним використання алгоритму зворотнього поширення штучної нейромережі (ШНМ) прямого типу для ідентифікування похибки визначення кута рухомого об'єкта навколо вертикальної осі  $\Delta\phi_z$ , використовуючи оцінку похибки  $\Delta\phi_y$ .

За допомогою навчання нейромережі визначено значення вагових коефіцієнтів  $W_{1j}$ ,  $W_{2j}$  і зсувів  $b_1, b_2$ , що зведені в табл.1. Функція зв'язку між похибками кутової орієнтації  $\Delta\phi_y$  і  $\Delta\phi_z$  описується формулою:

$$\Delta\phi_z(t) = \sum_{j=1}^N W_{2j} \cdot \left( \text{sigm}(W_{1j} \cdot \Delta\phi_y(t) + b_{1j}) \right) + b_2. \quad (11)$$

Для випадку напівнатурного моделювання роботи інтегрованої системи орієнтації та навігації приймалося  $N = 10$ .

**Таблиця 1.**

Значення вагових коефіцієнтів і зсувів ШНМ

J	Перший шар		Другий шар	
	$W_{1j}$	$b_1$	$W_{2j}$	$b_2$
1	-0.30639	-0.61104	-0.090224	0.93935
2	-0.24279	-0.33402	0.085193	
3	-0.81676	0.33562	1.019	

*Прилади і методи контролю*

4	0.77613	-0.54578	-1.4096
5	0.70436	-0.32894	-0.32944
6	0.50619	-1.0004	-1.43
7	0.49471	0.86287	-0.053598
8	-8.328	-0.65227	-2.5954
9	-1.2699	-0.23503	1.4202
10	7.4136	1.2289	-5.1152

На рис. 1 та рис. 2 показані результати ідентифікації похибки кутової орієнтації  $\Delta\varphi_z$  з використанням функції зв'язку (11) та значень вагових коефіцієнтів і зсувів ШНМ (табл. 1).

Таким чином, як видно з рис. 1 та рис. 2 відносна похибка апроксимації похибки кутової орієнтації  $\Delta\varphi_z$  функцією (11) знаходиться у межах 2%.

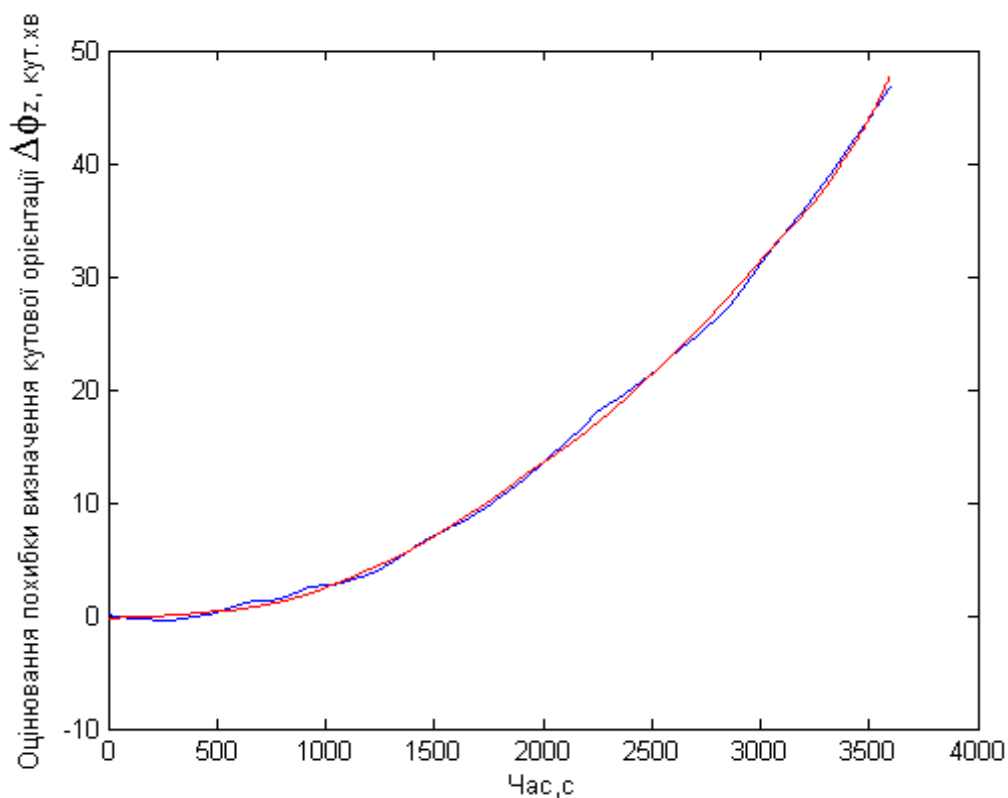


Рис. 1. Оцінка визначення кутової орієнтації  $\Delta\varphi_z$ , кут.хв.

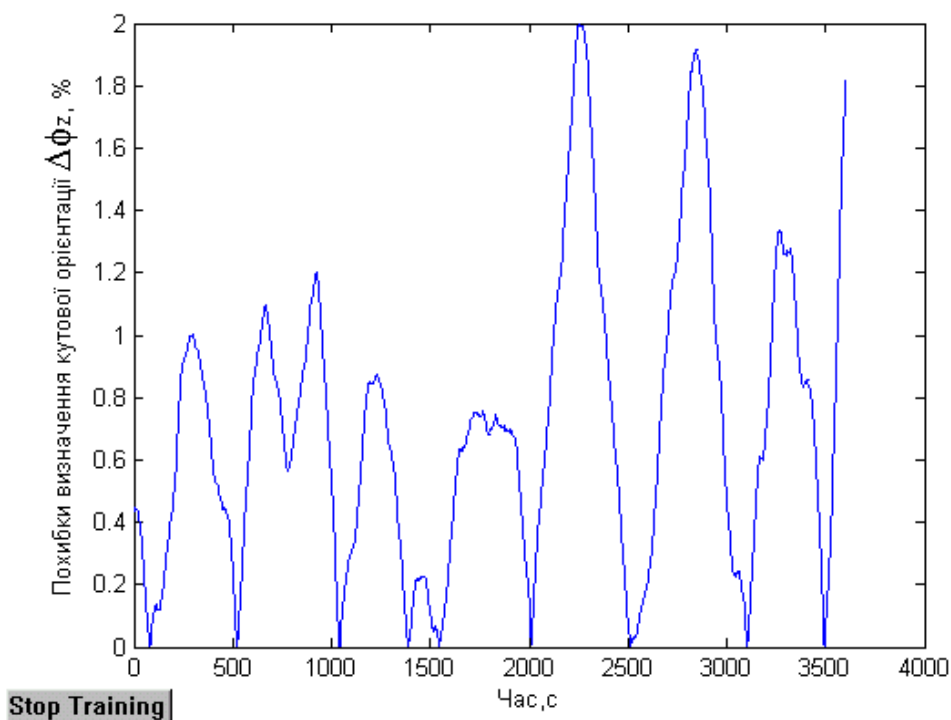


Рис. 2. Відносна похибка визначення кутової орієнтації з використанням штучної нейромережі

### Висновки

Проведені в даній роботі дослідження показали можливість підвищення точності, достовірності та надійності визначення місцезнаходження та орієнтації рухомого об'єкта в реальному часі за рахунок використання нейромережевих алгоритмів в обчислювачі інтегрованої системи орієнтації та навігації.

Одержано наступні результати: похибки визначення координат рухомого об'єкта знизилися: по висоті з 10 м до 0,71 м, по широті з 6 м до 0,54 м, по довготі з 5 м до 0,49 м, а СКВ похибки визначення швидкості – відповідно з 0,05 м/с до 0,0086 м/с. За допомогою нейромережевих алгоритмів похибки оцінювання кутової орієнтації рухомого об'єкта склали близько 20 кут. хв.

### Список використаної літератури

1. Розробка та дослідження системи орієнтації та навігації безпілотного літального апарату з використанням мікромеханічних технологій та багатоантенних GPS/ГЛОНАСС приймачів / О. В. Збруцький, О. І. Нестеренко, О. В. Прохорчук, А. Г. Січкара // Зб. праць інституту математики НАН України. – Сучасні проблеми аналітичної механіки. – 2004.–1, №2. – С.97–114.

2. Прохорчук О. В. Узагальнений алгоритм оцінки чутливості спостерігачів Калманівського типу до неточності задання параметрів математичної моделі системи / О.В.Прохорчук, П. В. Войлов // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2010. – №5. – С.18–23.
3. Прохорчук О. В. Комбінований спостерігач калманівського типу для оцінювання похибок інтегрованої БІНС/СНС системи / О. В. Прохорчук, І. С. Студзінська // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2010. – №.22 – С.43–51.
4. Браммер Л. Фільтр Калмана-Бьюси /Л. Браммер, Г. Зифлинг// М.: Наука, 1982. – 200 с.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман// М.: Мир, 1984. – 720 с.
6. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. Леондеса К. Т. – М.: Связь, 1973. – 408 с.
7. Збруцкий А. В. Алгоритмические методы повышения точности гирокомпаса / А. В. Збруцкий, М. Рахмуни // В сб. докладов XI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – С.-Петербург, ЦНИИ “Электроприбор”, 2004. – С. 142–144.
8. Zbrutsky A. V. Artificial Intelligence Algorithms for Increasing the Accuracy of Navigation System / A. V. Zbrutsky, A. S. Dovgopoly, M. Rahmouni // Symposium Gyro Technology. – Stuttgart, Germany, 2004. – P.18.0–18.6.

