

Дослідження надійності надмірних інерціальних вимірювачів з неортогональною конфігурацією

Наведено характеристику надмірних інерціальних вимірювачів з неортогональною конфігурацією. Виконано порівняння ортогональної та неортогональної конфігурацій вимірювачів. Представлено матриці напрямних косинусів між вимірювальною та навігаційною системами координат. Виконано порівняльний розрахунок показників надійності досліджуваних вимірювачів.

Вступ. Одним із напрямів сучасного навігаційного приладобудування, характерним для розвинених країн усього світу, є створення складних навігаційних приладів, що за своїми функціональними можливостями наближаються до інерціальних навігаційних систем, але характеризуються меншою вартістю та габаритами. Успішний розвиток такого напряму зумовлений, по-перше, появою високоточних і малогабаритних вимірювачів навігаційної інформації, по-друге, прогресом обчислювальної техніки в плані збільшення швидкодії та обсягів пам'яті, по-третє, прогресом засобів обслуговуючої електроніки [1]. Перша обставина дає змогу включати до складу навігаційного приладу датчики просторового положення, акселерометри та створювати систему, здатну виконувати функції інерціальної навігаційної системи за менших витрат маси та габаритів, а також використовувати надмірність для підвищення надійності цих систем. Наявність акселерометрів забезпечує корекцію і відповідно збільшення точності датчиків просторового положення, а також можливість отримання інформації про швидкість і пройдений об'єктом шлях після відповідного інтегрування [2]. Друга обставина дає змогу реалізовувати досить складні алгоритми опрацювання навігаційної інформації, а також підвищувати точність отриманої інформації алгоритмічними засобами. І, нарешті, третя обставина дає змогу забезпечити складний процес з'єднання високоточних навігаційних датчиків, сервісної електроніки та обчислювачів. При цьому однією з актуальних проблем залишається підвищення точності вимірювальних пристроїв, що входять до складу навігаційних систем, з одночасним підвищенням їхньої надійності. У багатьох випадках підвищення надійності пов'язане з використанням апаратурної надмірності. Але при цьому необхідно враховувати масогабаритні обмеження, що мають місце, незважаючи на значний прогрес у мініатюризації сучасних навігаційних датчиків.

Існує кілька підходів до використання надмірності в навігаційних системах. Найпоширенішим підходом є резервування вимірювальних навігаційних пристроїв. У разі визначення проекцій навігаційного параметра за осями базової навігаційної системи координат, можливе використання надлишкових вимірювальних базисів. Таке завдання є актуальним для сучасного навігаційного приладобудування, оскільки інформація про куту швидкість або

прискорення за всіма осями навігаційної системи координат широко використовується в законах керування сучасними рухомими об'єктами.

Метою доповіді є дослідження показників надійності надлишкових неортогональних систем навігаційних датчиків.

Дослідження надійності надмірних неортогональних вимірювачів.

Традиційна постановка задачі вимірювання проекцій навігаційного параметра ілюструється рис. 1. Збільшення надійності системи за рахунок дублювання вимірювальних пристроїв за кожною вимірювальною віссю показано на рис. 2. Слід зазначити, що, незважаючи на значний прогрес мініатюризації навігаційних датчиків, використання більш ніж двох вимірювачів на кожній вимірювальній осі не видається доцільним з огляду на масогабаритні обмеження. Схема, представлена на рис. 2, забезпечує збереження працездатності навігаційної системи навіть у разі виходу з ладу трьох вимірювальних пристроїв, але ці пристрої мають розташовуватися на різних вимірювальних осях. Тобто вихід з ладу двох вимірювальних пристроїв, розташованих на одній вимірювальній осі, що є цілком можливим, призводить до втрати працездатності ортогональної надлишкової системи навігаційних датчиків.

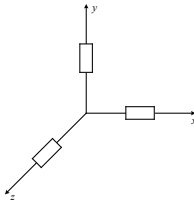


Рис 1. Ортогональна вимірювальна система

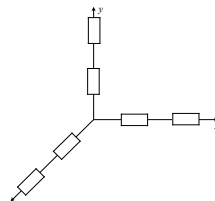


Рис. 2. Ортогональна надлишкова вимірювальна система

Розв'язання цієї проблеми можливе за рахунок використання надлишкових неортогональних базисів. Відомі три підходи до побудови таких надлишкових вимірювальних базисів:

1) використання як фігури симетрії конуса й розташування навігаційних датчиків за утворювальними конуса, як це показано на рис. 3;

2) використання як фігури симетрії конуса і розташування навігаційних датчиків по твірних конуса і по осі його симетрії;

3) розташування навігаційних датчиків відносно граней правильних багатогранників відповідно до рис. 4.

Використання надлишкових вимірювальних базисів на основі розташування вимірювальних пристроїв по твірних конуса або відносно граней багатогранника дає змогу збільшити кількість надлишкових проекцій по кожній осі базової системи координат. Це призводить до підвищення надійності за менших масогабаритних витрат, а також надає певні можливості для підвищення точності вимірювальної інформації шляхом використання алгоритмів обробки надлишкових даних. Крім того, використання таких базисів дає змогу використовувати алгоритми виявлення датчиків, що відмовили, з метою їхнього виключення з процесу оброблення та отримання інформації.

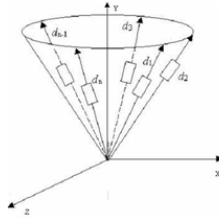


Рис. 3. Неортогональна вимірювальна система з розташуванням датчиків по твірних конуса

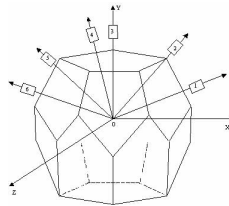


Рис. 4. Неортогональна вимірювальна система з розташуванням датчиків щодо граней багатогранника

У разі використання неортогональних вимірювальних базисів необхідно використовувати алгоритми перетворення вимірювальної інформації, отриманої в такій системі координат, до ортогональної системи координат, що збігається з власними осями рухомого об'єкта. Таке перетворення забезпечує керування рухомих об'єктом. Воно описується матрицею напрямних косинусів L , а її похибка може бути визначена відповідно до формули $D=[L^T L]^{-1}$ [3]. Похибка самого перетворення характеризується слідом матриці D .

Для підтвердження ефективності використання неортогональних надлишкових систем можна порівняти матриці напрямних косинусів ортогональної системи, наведеної на рис. 1, і матриці напрямних косинусів системи, яка складається з датчиків, розташованих по твірних конуса (рис. 3).

Матриця перетворення ортогональної системи L_1 має вигляд, представлений у табл. 1.

Таблиця 1

Матриця ортогональної системи

	x	y	z
d_1	$\cos \theta$	0	0
d_2	0	$\cos \theta$	0
d_3	0	0	$\cos \theta$

Матриця неортогональної надлишкової системи, що складається з 6 датчиків, розташованих по твірних конуса L_2 , визначається таким чином (див. табл. 2).

Таблиця 2

Матриця неортогональної надлишкової системи

	x	y	z
d_1	0	$\cos \vartheta$	$\sin \vartheta$
d_2	$\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$\cos \pi / 3 \sin \vartheta$
d_3	$\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$-\cos \pi / 3 \sin \vartheta$
d_4	0	$\cos \vartheta$	$-\sin \vartheta$
d_5	$-\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$-\cos \pi / 3 \sin \vartheta$
d_6	$-\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$\cos \pi / 3 \sin \vartheta$

Відповідно сліди цієї матриці, що являють собою критерії ефективності обробки інформації, мають вигляд

$$\text{tr}[\mathbf{L}_{1T}\mathbf{L}_1]^{-1} = \text{tr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3 \quad \text{tr}[\mathbf{L}_{2T}\mathbf{L}_2]^{-1} = \text{tr} \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix} = 1,5$$

де $\theta = 54^\circ 44'$

Порівняльний аналіз цих критеріїв свідчить про те, що неортогональна надлишкова система забезпечує більшу точність обробки інформації.

Розглянемо варіант відмови двох навігаційних датчиків у неортогональній надлишковій системі. У цьому випадку матриця напрямних косинусів \mathbf{L}_3 визначається табл. 3.

Таблиця 3

Матриця напрямних косинусів

	x	y	z
d_1	0	$\cos \vartheta$	$\sin \vartheta$
d_2	$\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$-\cos \pi / 3 \sin \vartheta$
d_3	$-\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$-\cos \pi / 3 \sin \vartheta$
d_4	$-\sin \pi / 3 \sin \vartheta$	$\cos \vartheta$	$\cos \pi / 3 \sin \vartheta$

$$\text{Слід матриці виглядатиме: } \text{tr}[\mathbf{H}_T\mathbf{H}]^{-1} = \text{tr} \begin{bmatrix} 0,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0,83 & 0 \\ 0 & 0 & 0,92 \end{bmatrix} = 2,5$$

Таким чином, надлишкова неортогональна система навіть з урахуванням відмови двох вимірювачів характеризується кращим показником ефективності обробки інформації.

Аналіз можливих варіантів орієнтації датчиків у неортогональних надлишкових системах виконано в роботі [4]. Для дослідження відмовостійкості розглянутих систем розглянемо можливість відмови одного і двох датчиків відповідно й оцінимо ефективність опрацювання інформації в кожному з цих випадків.

Таблиця 4

	Всі датчики	Відмова 1 датчика	Відмова 2 датчиків
5 датчиків за твірними конуса	2,21	3,20	3,92
4 датчики по твірних конуса і один по осі симетрії	1,93	3,15	5,00
6 датчиків за утворювальними конуса	1,79	2,13	4,50
5 датчиків за утворювальними конуса і один за віссю симетрії	1,70	2,18	3,35
6 датчиків по додекаедру	1,50	2,00	3,00

Функціональна схема надійності ортогональної вимірвальної системи має вигляд, представлений на рис. 5.

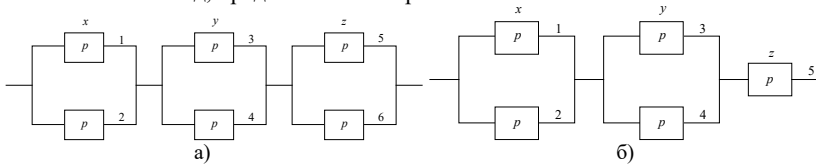


Рис. 5. Функціональна схема надійності ортогональної вимірвальної системи (1, 2, 3, 4, 5, 6 - номери датчиків, p - ймовірність безвідмовної роботи кожного датчика): а) всі датчики працездатні; б) відмова 1 датчика

Вважаючи ймовірності безвідмовної роботи датчиків однаковими, можна отримати такі вирази для визначення ймовірності безвідмовної роботи:

$$P_c(t) = [1 - (1 - p)^2]^3 - \text{всі датчики працюють;}$$

$$P_c(t) = p[1 - (1 - p)^2]^2 - \text{відмова 1 датчика;}$$

$$P_c(t) = p^2[1 - (1 - p)^2] - \text{відмова 2 датчиків;}$$

$$P_c(t) = p^3 - \text{відмова 3 датчиків.}$$

Функціональна схема надійності неортогональної надмірного вимірвача має вигляд, представлений на рис. 6.

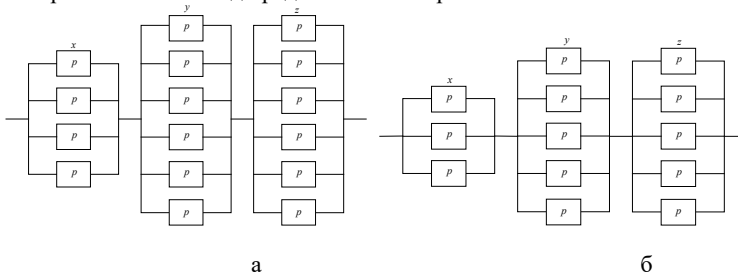


Рис. 6. Функціональна схема надійності неортогональної вимірвальної системи (1, 2, 3, 4, 5, 6 - номери датчиків, p - ймовірність безвідмовної роботи кожного датчика): а) всі датчики працездатні; б) відмова 1 датчика

При цьому ймовірність безвідмовної роботи описується такими формулами:

$$P_c(t) = [1 - (1 - p)^4] [1 - (1 - p)^6]^2 - \text{всі датчики працюють};$$

$$P_c(t) = [1 - (1 - p)^3] [1 - (1 - p)^5]^2 - \text{відмова 1 датчика по кожній вимірювальній осі};$$

$$P_c(t) = [1 - (1 - p)^2] [1 - (1 - p)^4]^2 - \text{відмова 2 датчиків по кожній вимірювальній осі};$$

$$P_c(t) = p [1 - (1 - p)^3]^2 - \text{відмова 3 датчиків по кожній вимірювальній осі}.$$

Надмірність інформації забезпечує можливість застосування досить складних алгоритмів обробки інформації. Одним із найпоширеніших алгоритмів є визначення навігаційного датчика з максимальною похибкою з метою подальшого виключення цього датчика з вимірювальної системи. Але аналіз вимог до сучасних навігаційних систем показує, що найкращим є комбіноване використання алгоритму медіани та визначення середнього. У цьому разі визначають максимальну та мінімальну похибки навігаційних датчиків, і ці значення відкидають. Решту значень використовувати для визначення інформації про проекції навігаційного параметра.

Висновки. Дослідження надійності неортогональних надлишкових систем навігаційних датчиків підтверджує можливість їх використання для організації високоточних і надійних вимірювань.

Список літератури

1. M. Jafari, "Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation systems," *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 467–472/
2. O.A. Sushchenko, Y.N. Bezkorovainyi, and N.D. Novytska, "Non-orthogonal redundant configurations of inertial sensors," in *Proc. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD 2017)*, Kyiv, Ukraine, 2018, October 17 – 19, pp. 73–78, doi: 10.1109/APUAVD.2017.8308780
3. R.H. Rogne, T. H. Bryne, T. I., Fossen, T.A. Johansen, "Redundant MEMS-based inertial navigation using nonlinear observers," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2018, vol. 140 (7), Paper No DS-17-1023, 7 p/
4. O.A. Sushchenko, Y.M. Bezkorovainyi, V.O. Golitsyn, "Fault-tolerant Inertial Measuring Instrument with Neural Network," in *Proc. IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, pp. 797–801.