

ІНФОРМАТИКА

УДК 621.317.08

© Рудик А.В.*

ЗВ'ЯЗОК ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ПОСТІЙНОЇ СКЛАДОВОЇ ПОХИБКИ МЕМС АКСЕЛЕРОМЕТРІВ З ВАРІАЦІЄЮ АЛАНА

В статті встановлено зв'язок варіації Алана з дисперсією похибки оцінювання постійної складової вихідного сигналу інерціального сенсора, отриманої при усередненні. Показано, що за допомогою варіації Алана, нечутливої до наявності постійної складової, можна оцінювати мінімальне значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення та визначати оптимальний час усереднення, що є важливим при калібруванні інерціальних сенсорів. Розроблено та протестовано спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислення варіації Алана за результатами обробки високочастотної інформації інерціальних сенсорів. Проведено оцінки шумових складових вихідних сигналів МЕМС акселерометрів типу Gemini CAS211/291 в трьох запусках з подальшим визначенням часу усереднення для кожної осі акселерометра.

Ключові слова: варіація Алана, постійна складова похибки, точність оцінювання, дисперсія похибки, метод усереднення, спектральна густина шуму.

Рудик А.В. Связь точности оценивания постоянной составляющей погрешности МЭМС акселерометров с вариацией Аллана. В статье установлена связь вариации Аллана с дисперсией погрешности оценивания постоянной составляющей выходного сигнала инерциального сенсора, полученной при усреднении. Показано, что при помощи вариации Аллана, нечувствительной к наличию постоянной составляющей, можно оценивать минимальные значения дисперсии погрешности оценивания постоянной составляющей методом усреднения и определять оптимальное время усреднения, что важно при калибровке инерциальных сенсоров. Разработано и протестировано специализированное программное обеспечение, которое позволяет проводить вычисления вариации Аллана по результатам обработки высокочастотной информации инерциальных сенсоров. Проведены оценки шумовых составляющих выходных сигналов МЭМС акселерометров типа Gemini CAS211/291 в трёх запусках с дальнейшим определением времени усреднения для каждой оси акселерометра.

Ключевые слова: вариация Аллана, постоянная составляющая погрешности, точность оценивания, дисперсия погрешности, метод усреднения, спектральная плотность шума.

A.V. Rudyk. Relationship of the accuracy of estimation of the constant error component of the MEMS accelerometers with the Allan variation. The article has established the relationship between the Allan variation and the estimation error variance of the constant component of output signal of the inertial sensor obtained at averaging. It is shown that under certain conditions the Allan variation coincides with the estimation error variance of a constant component. This allows through the use of the Allan variation curve, insensitive to a constant component to estimate the minimum value of the estimation error variance of a constant component by the method of averages and to determine averaging optimal time which is important when calibrating inertial sensors. Thus, according to the Allan variation curve, which is insensitive to the presence of a constant component, it is

* канд. техн. наук, доцент, докторант, Національний авіаційний університет, м. Київ, andrey4453117@gmail.com

possible to draw conclusions as to the accuracy of its evaluation. In this case optimal averaging time as to the criterion of minimum variance is directly proportional to the square root of the ratio of intensity of white noise to intensity generating noise of the Wiener process and the error variance is directly proportional to their multiplication and square of the instability factor of the output signals zero shifting. According to this method, which is based on using the Allan variation, a specialized software has been developed and tested that allows computing the Allan variation on the results of processing of high-frequency data inertial sensors (accelerometers and gyros) in the long lasting launches from the subsequent polynomial approximation. An assessment of noise components of the output signals of MEMS accelerometers Gemini CAS211/291 in three subsequent launches followed by averaging time appraisal for each accelerometer axis and calculation of minimum variance and mean square deviation of the estimation errors of constant components at their calculation by averaging have been accomplished. Later in the research of accuracy characteristics of navigational instruments and appliances at instrument making plants it was proposed to use both the classical methods of statistical analysis and the Allan variations method as an effective way to identify the noise patterns in the channel of a measurement means.

Keywords: *Allan variation, constant error component, estimation accuracy, error variance, method of averages, noise spectral density.*

Постановка проблеми. Для практичних цілей важливою є задача визначення постійної складової похибки, особливо у випадках, коли сигнали інерціальних сенсорів, які входять до складу інерціальних вимірювальних модулів (ІВМ), інтегруються. В даному випадку виникають похибки визначення орієнтації, швидкості та координат, які з часом збільшуються. Часто визначення постійної складової похибки проводиться при звичайному усередненні реалізації похибки сенсора на кінцевому інтервалі часу, тому виникає питання про обґрунтований вибір часу усереднення, при якому дисперсія похибки отриманої таким чином оцінки постійної складової досягає мінімального значення. Актуальним також є питання про можливості підвищення точності оцінювання постійної складової при використанні сучасних алгоритмів, які не зводяться до простого усереднення, а враховують наявність різних складових похибки. Однак очевидним є те, що оцінка, отримана при усередненні, не є оптимальною за критерієм мінімуму дисперсії її похибки при наявності негаусівських складових похибки сенсора. Відомо, що метод варіацій Алана нечутливий до наявності постійної складової похибки, яка виключається при визначенні різниць усереднених значень. Однак з використанням даного алгоритму можна розрахувати точність оцінювання постійної складової похибки, не оцінюючи саму цю складову.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідентифікація моделі похибок інерціальних сенсорів, зокрема акселерометрів, та визначення її параметрів є важливою задачею, яка розв'язується при їх дослідженні та калібруванні. Для побудови моделі випадкових складових похибки використовуються алгоритми визначення спектральних густин та кореляційних функцій [1, 2], а останнім часом – метод варіацій Алана, згідно з яким визначається або варіація Алана (*Allan Variance (AVAR)*) $\sigma_A^2(\tau)$, або відхилення Алана (*Allan Deviation (AD)*) $\sigma_A(\tau)$ [3, 4]. Крім того, відбувається активний пошук нових підходів, основаних на методах нелінійної фільтрації [5, 6]. Тому для розв'язання проблеми підвищення точності оцінювання постійної складової похибки інерціальних сенсорів в статті необхідно:

- 1) встановити зв'язок варіації Алана з дисперсією похибки оцінювання постійної складової вихідного сигналу інерціального сенсора, отриманої при усередненні;
- 2) визначити оптимальний час усереднення та мінімальне значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення;
- 3) розробити та протестувати спеціалізоване програмне забезпечення для обчислення варіації Алана за результатами обробки високочастотної інформації інерціальних сенсорів з подальшою поліноміальною апроксимацією;
- 4) оцінити шумові складові вихідних сигналів мікроелектромеханічних (МЕМС) акселерометрів для визначення часу усереднення та обчислення мінімальної дисперсії похибок оцінювання постійних складових при їх знаходженні шляхом усереднення.

Метою статті є встановлення взаємозв'язку дисперсії похибки оцінки постійної складової

вої, отриманої при усередненні, з варіацією Алана і практична оцінка оптимального часу усереднення та мінімального значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової.

Викладення основного матеріалу. 1. Точність оцінювання постійної складової похибки інерціального сенсора при усередненні та її зв'язок з варіацією Алана. Будемо вважати, що безпосередньо вимірюється реалізація похибки інерціального сенсора $z(t)$, яку можна представити у вигляді

$$z(t) = z_0 + \xi(t), \quad (1)$$

де $\xi(t)$ – в загальному випадку нестационарний центрований випадковий процес, для якого $\xi(0) = 0$; z_0 – постійна складова.

Будемо вважати, що оцінка $\hat{z}_{0\tau}$ постійної складової z_0 за результатами усереднення реалізації $z(t)$ обчислюється при звичайному усередненні даної реалізації на кінцевому часовому інтервалі τ , тобто

$$\hat{z}_{0\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau z(t) dt = z_0 + \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \xi(t) dt. \quad (2)$$

Така задача оцінювання постійної складової має місце при калібруванні інерціальних сенсорів на нерухомій основі або на стенді при порівнянні їх вихідних сигналів з сигналом сенсора більш високого класу точності. Для похибки такої оцінки та її дисперсії можна записати:

$$\Delta z = \hat{z}_{0\tau} - z_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \xi(t) dt; \quad \sigma_{\Delta z}^2 = M\{(\hat{z}_{0\tau} - z_0)^2\} = M\left\{\left(\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \xi(t) dt\right)^2\right\} = \frac{1}{\tau^2} M\left\{\left(\int_0^\tau \xi(t) dt\right)^2\right\}. \quad (3)$$

Як було зазначено, при дослідженні властивостей похибок інерціальних сенсорів використовується метод варіацій Алана, згідно з яким для процесу $z(t)$ застосовується такий запис [7]:

$$\sigma_{A\{z(t)\}}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} [\bar{z}_{k+1}(\tau) - \bar{z}_k(\tau)]^2, \quad (4)$$

де $\bar{z}_{k+1}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} z(t) dt$ – середнє значення реалізації $z(t)$ на інтервалі від $k\tau$ до $(k+1)\tau$; N – кількість інтервалів.

Оскільки варіація Алана є нечутливою до постійної складової, що можна довести підстановкою (1) в (4), запишемо:

$$\sigma_{A\{z(t)\}}^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} \left[\int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \xi(t) dt - \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \xi(t) dt \right]^2. \quad (5)$$

Встановимо взаємозв'язок дисперсії похибки оцінки постійної складової (3), отриманої при усередненні, з варіацією Алана. Якщо справедливим є вираз

$$\frac{1}{2} M\left\{\left(\int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \xi(t) dt - \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \xi(t) dt\right)^2\right\} = M\left\{\left(\int_0^\tau \xi(t) dt\right)^2\right\} \quad \text{при } \forall k > 0, \quad (6)$$

то варіація Алана для $z(t)$ (4) є оцінкою дисперсії похибки випадкової величини (3). Умова (6) виконується, якщо $\xi(t)$ є білим шумом, вінерівським випадковим процесом або їх сумою.

Збіг варіації Алана з дисперсією похибки оцінки постійної складової є корисним з практичної точки зору, оскільки за точкою мінімуму графіку $\sigma_A^2(\tau)$ можна визначити оптимальний час усереднення та відповідну йому мінімальну дисперсію похибки оцінювання постійної складової при її знаходженні шляхом усереднення. Таким чином, за графіком варіації Алана, яка нечутлива до наявності постійної складової, можна робити висновки про точність її оцінювання.

2. Зв'язок спектральної густини шуму та варіації Алана. Для випадкової послідовності дисперсія Алана має зв'язок з спектральною густиною потужності $S_\omega(f)$, що є класичною характеристикою випадкового процесу в частотній області [7]:

$$\sigma_A^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_\omega(f) \cdot \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df.$$

За методом варіацій Алана можна виділити сім складових шуму вимірювань [8]. При цьому дві складові (шум кореляції та синусоїдальний шум) в більшості випадків проявляються тільки на великих інтервалах усереднення, тому в роботі розглядаються тільки п'ять шумових характеристик. Характерні нахили залежності $\sigma_A(\tau)$ для акселерометра наведені на рис. 1.

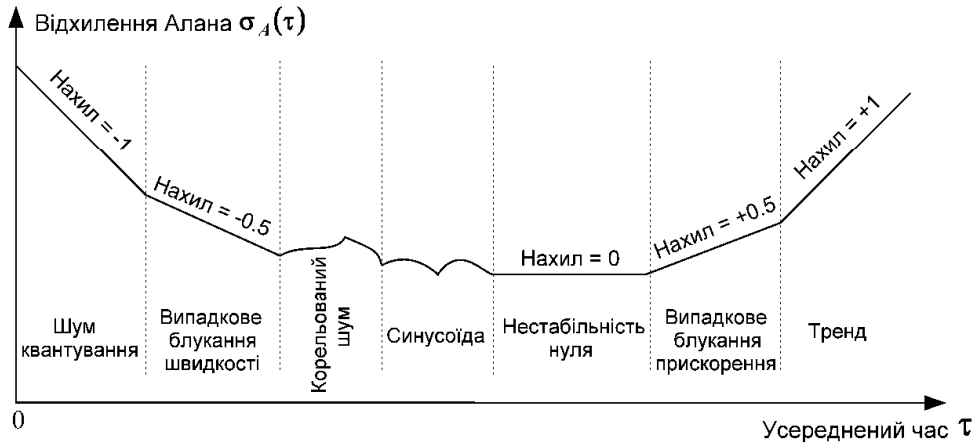


Рис. 1 – Загальний вигляд кривої відхилення Алана для акселерометра

Використовуючи основні шумові компоненти, які дозволяє відокремити метод варіацій Алана, запишемо апроксимуюче співвідношення для варіації Алана поліномом $p_A^2(\tau)$ так [9]:

$$\sigma_A^2(\tau) \approx p_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2 \ln 2}{\pi} + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}. \quad (7)$$

В таблиці 1 наведені співвідношення між параметрами розкладу варіації Алана та спектральною густиною шуму $S_\omega(f)$ [10], а також характерні значення кутів нахилу залежності $\sigma_A(\tau)$. Значення коефіцієнтів R, K, B, N, Q поліному (7) характеризують інтенсивність окремих шумових складових вихідного сигналу сенсора. Визначення їх числових значень відбувається за методом найменших квадратів (МНК), який забезпечує максимальний збіг апроксимуючої функції $p_A^2(\tau)$ з експериментальною $\sigma_A^2(\tau)$. Для кількісної оцінки коефіцієнтів поліному (7) використовують тенденцію домінування окремих складових на різних інтервалах усереднення τ , що проявляється в характерних нахилах залежності $\sigma_A(\tau)$.

Таблиця 1

Співвідношення між спектральною густиною шуму та варіацією Алана

Тип похибки в термінах $S_\omega(f)/\sigma_A^2(\tau)$	Спектральна густина шуму $S_\omega(f)$	Варіація Алана $\sigma_A^2(\tau)$	Коефіцієнт поліному $p_A^2(\tau)$	Нахил залежності $\sigma_A(\tau)$
1. Білий шум вихідного сигналу/шум квантування	$(2\pi f)^2 Q^2 \tau_0$ при $f < 1/2\tau_0$	$Q^2 \frac{3}{\tau^2}$	Q – похибка квантування вихідного сигналу	-1
2. Білий шум зміни вихідного сигналу/випадкове блукання вихідного сигналу	N^2	$N^2 \frac{1}{\tau}$	N – коефіцієнт випадкового блукання вихідного сигналу	-0.5
3. Флікер-шум вихідного сигналу/нестабільність зміщення нуля	$\begin{cases} \frac{B^2}{2\pi f}, f \leq f_0; \\ 0, f > f_0 \end{cases}$	$\frac{2B^2}{\pi} [\ln 2 - \frac{\sin^3 \tau}{2\tau^2} (\sin \tau + 4\tau \cos \tau)] \approx \frac{2B^2}{\pi} \ln 2$	B – коефіцієнт нестабільності зміщення нуля вихідного сигналу	0

Продовження таблиці 1

4. Білий шум зміни швидкості зміни вихідного сигналу/випадкове блукання зміни вихідного сигналу	$\left(\frac{K}{2\pi f}\right)^2$	$K^2 \frac{\tau}{3}$	K – коефіцієнт випадкового блукання швидкості зміни вихідного сигналу	+0.5
5. Шум уходу вихідного сигналу/тренд вихідного сигналу	$\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$	$R^2 \frac{\tau^2}{2}$	R – коефіцієнт випадкового уходу вихідного сигналу	+1

3. Чисельна оцінка коефіцієнтів варіації Алана та точності оцінювання постійної складової похибки МЕМС акселерометрів. З врахуванням кратності інтервалу усереднення даних кроку опитування інерціальних сенсорів співвідношення (4) можна записати так:

$$\sigma_{A(z(t))}^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} [\bar{z}_{k+2n}(\tau) - 2\bar{z}_{k+n}(\tau) + \bar{z}_k(\tau)]^2, \quad (8)$$

де $n=1, 2, \dots, \frac{N-1}{2}-1$ – кратність інтервалу усереднення даних; $\tau = n\tau_0$ – інтервал усереднення даних; τ_0 – крок опитування сенсора; $t = k\tau_0$ – дискретні моменти вимірювань ($k=1, 2, \dots, N$).

Обробка вихідної інформації за методом варіації Алана проводилася за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення власної розробки в середовищі програмування *Delphi*, а також з використанням системи комп'ютерної алгебри *MathCad*. Дане програмне забезпечення вибірково протестоване «Програмою обробки масивів даних методами варіацій Алана, Адамара та їх узагальнень *AlaVar 5.2*» [11], викладеною в мережі *Internet*. Програмна реалізація співвідношення (8) для вихідної інформації інерціальних сенсорів, заданої в приростах, представлена у вигляді рекурентного співвідношення такого виду:

$$D_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\Delta\bar{z}_{i+n} - \Delta\bar{z}_i]; \quad S_0 = 0; \quad D_k = D_{k-1} + \Delta\bar{z}_{k+2n} - 2\Delta\bar{z}_{k+n} + \Delta\bar{z}_k; \quad (9)$$

$$S_k = S_{k-1} + D_k^2; \quad \sigma_A^2(\tau) = \frac{S_{N-2n}}{2(N-2n)},$$

де $\Delta\bar{z}$ – інформація про прирости вихідного сигналу інерціального сенсора z з усередненням на інтервалі τ ; D, S – проміжні змінні для обчислення варіації Алана $\sigma_A^2(\tau)$.

В роботі [12] проведено дослідження МЕМС-акселерометрів типу *Gemini CAS211/291*, які проводилися для кожної осі акселерометра з частотою дискретизації 100 Гц. За результатами проведених досліджень на рис. 2 наведені криві відхилення Алана.

При малих значеннях τ спостерігається нахил -0.5 кривих відхилення Алана, що відповідає наявності білого шуму у вихідних сигналах акселерометрів. В області $\tau = (40 \div 400)$ с криві відхилення Алана мають мінімум на ділянці з нульовим нахилом, що відповідає нестабільності нуля. При подальшому збільшенні часу усереднення τ криві відхилення Алана мають злам та набувають позитивного нахилу $+0.5$, що характеризує наявність випадкового блукання прискорення у вихідних сигналах акселерометрів. Локального максимуму між асимптотами з нахилами $+0.5$ і -0.5 на кривих відхилення Алана не спостерігається, що говорить про відсутність марковського шуму у вихідних сигналах акселерометрів.

Тому що за експериментальними результатами (рис. 2) у вихідних сигналах акселерометрів виявлено лише складові, що відповідають випадковим блуканням швидкості та прискорення і нестабільності нуля, то апроксимуюче співвідношення для варіації Алана (7) перепишемо так:

$$\sigma_A^2(\tau) \approx p_A^2(\tau) = K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2 \ln 2}{\pi} + N^2 \frac{1}{\tau}. \quad (10)$$

Диференціюючи (10) за τ і прирівнюючи похідну до нуля, можна отримати оптимальний

за критерієм мінімуму дисперсії час усереднення та відповідну мінімальну дисперсію оцінки:

$$\tau_{opt} \equiv \frac{\sqrt{3}N}{K}; \quad \sigma_{A,\min}^2(\tau_{opt}) \approx \frac{2KN}{\sqrt{3}} + B^2 \frac{2 \ln 2}{\pi}. \quad (11)$$

Таким чином, оптимальний за критерієм мінімуму дисперсії час усереднення прямо пропорційний кореню квадратному відношення інтенсивності білого шуму N^2 до інтенсивності породжуючого шуму вінерівського процесу K^2 , а дисперсія похибки прямо пропорційна їх добутку та квадрату коефіцієнта нестабільності зміщення нуля вихідного сигналу.

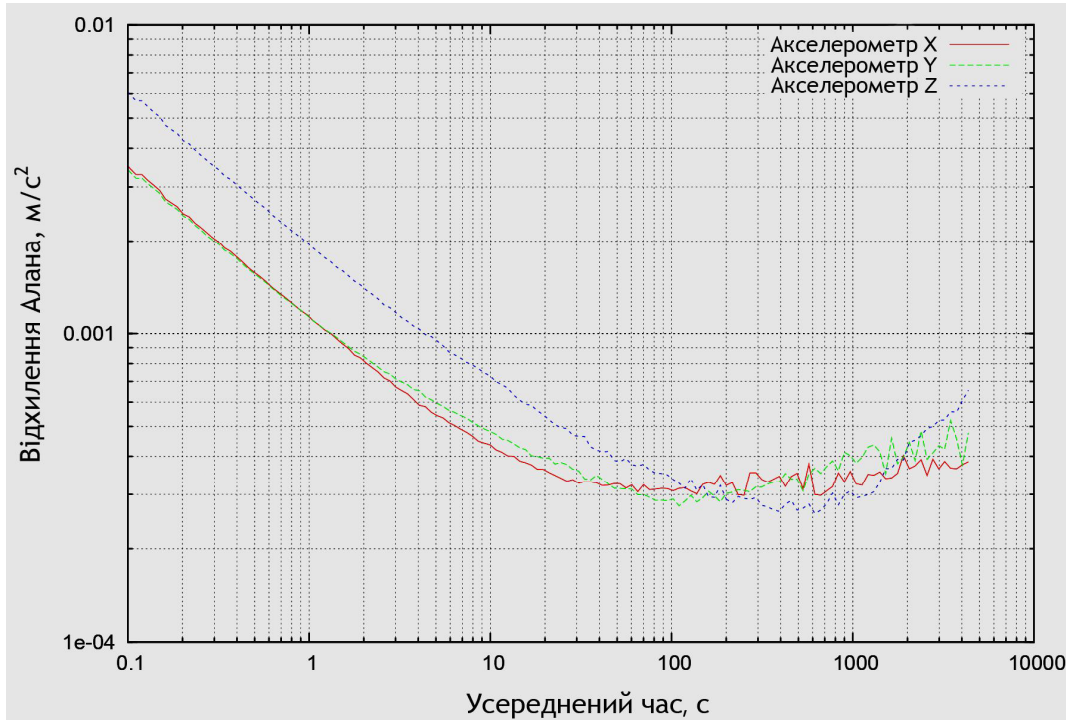


Рис. 2 – Криві відхилення Алана MEMC-акселерометрів типу Gemini CAS211/291

Для апроксимації отриманих кривих варіації Алана $\sigma_A^2(\tau)$ поліномом виду (7) або (10) використовується ітераційний МНК [13], реалізований засобами табличного редактора *Microsoft Excel*. На першому кроці для отримання попередніх оцінок K_1, B_1, N_1 шумових складових проводиться мінімізація функціонала виду

$$\sum_{n=1}^{N-1} \frac{[\sigma_A^2(n\tau_0) - p_A^2(n\tau_0)]^2}{\sigma_A^2(n\tau_0)} = \sum_{n=1}^{N-1} P(n\tau_0) \cdot [\sigma_A^2(n\tau_0) - p_A^2(n\tau_0)]^2, \quad (12)$$

де $P(n\tau_0) = \sigma_A^{-2}(n\tau_0)$ – вагові коефіцієнти.

Далі проводиться уточнення вагових коефіцієнтів у функціоналі (10) з врахуванням ваги окремих складових поліному (7). Так, наприклад, при визначенні коефіцієнта N випадкового блукання вихідного сигналу (випадкового блукання швидкості для акселерометра) вагові коефіцієнти МНК корегуються за співвідношенням

$$P(\tau = n\tau_0) = \frac{1}{\sigma_A^2(\tau) \cdot p_A^2(\tau)} \cdot \frac{N_1^2}{\tau}, \quad (13)$$

що дозволяє неявно виділяти характерні ділянки домінування основних типів шумів (ділянки нахилу залежностей $\sigma_A(\tau)$, наведених на рис. 2) та отримувати відповідні оцінки.

В таблиці 2 наведена чисельна оцінка коефіцієнтів K, B, N без врахування знаку, отримана за кривими відхилення Алана (рис. 2) за результатами обробки трьох 3-годинних запусків.

Для першого з запусків апроксимуючі співвідношення для варіацій Алана (10) для кожної осі MEMC-акселерометрів типу Gemini CAS211/291 за рис. 2 будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{A.X}^2(\tau) &\approx p_{A.X}^2(\tau) = (0.0012461\tau + 8.3072 + 114.9283/\tau) \cdot 10^{-8}; \\ \sigma_{A.Y}^2(\tau) &\approx p_{A.Y}^2(\tau) = (0.0020898\tau + 9.1023 + 111.4782/\tau) \cdot 10^{-8}; \\ \sigma_{A.Z}^2(\tau) &\approx p_{A.Z}^2(\tau) = (0.0022251\tau + 8.0072 + 336.3117/\tau) \cdot 10^{-8}. \end{aligned} \quad (14)$$

Достовірність отриманих значень визначалась виділенням для апроксимуючого поліному $p_A^2(\tau)$ ділянки з переважним впливом складової з відповідним коефіцієнтом та подальшого аналізу близькості його проходження відносно залежності $\sigma_A^2(\tau)$. Тому в таблиці 2 також наведені результати статистичної обробки: середнє (математичне сподівання – МС) за всіма запусками, довірчий інтервал для МС, розрахований для рівня значущості $\alpha = 0.05$, а також відхилення від запуску до запуску (середньоквадратичне відхилення (СКВ) на рівні 1σ), яке характеризує нестабільність від запуску до запуску.

Таблиця 2

Апроксимація варіації Алана поліномом для МЕМС-акселерометрів типу Gemini CAS211/291

Номер запуску	Коефіцієнти поліному $p_A^2(\tau)$								
	вісь X			вісь Y			вісь Z		
	$ K \cdot 10^{-6}$, м/с ² /√с	$ B \cdot 10^{-4}$, м/с ²	$ N \cdot 10^{-4}$, м/с/√с	$ K \cdot 10^{-6}$, м/с ² /√с	$ B \cdot 10^{-4}$, м/с ²	$ N \cdot 10^{-4}$, м/с/√с	$ K \cdot 10^{-6}$, м/с ² /√с	$ B \cdot 10^{-4}$, м/с ²	$ N \cdot 10^{-4}$, м/с/√с
1	6.1142	4.3377	10.7204	7.9181	4.5401	10.5583	8.1712	4.2586	18.3385
2	6.9514	4.8673	9.8734	8.6153	4.3827	10.3597	7.4924	5.0473	15.8756
3	6.5474	4.2198	11.0257	7.7456	4.8908	11.2375	8.8347	4.7804	17.9375
МС	6.5381	4.4749	10.5398	8.0931	4.6045	10.7185	8.1661	4.6954	17.3839
МС _{min} ÷МС _{max}	[6.0019÷ 7.0783]	[4.1307÷ 4.9792]	[9.6208÷ 11.3346]	[7.5211÷ 8.9317]	[4.2208÷ 5.1746]	[9.9243÷ 11.5687]	[7.0396÷ 9.2894]	[4.0683÷ 5.3748]	[15.1108÷ 19.1347]
СКВ σ	0.4204	0.3463	0.5994	0.4624	0.2612	0.4622	0.6739	0.4028	1.3269

За обчисленими в таблиці 2 математичними сподіваннями коефіцієнтів поліному $p_A^2(\tau)$ для трьох запусків визначимо оптимальний за критерієм мінімуму дисперсії час усереднення та відповідні мінімальні дисперсії та СКВ оцінки для кожної осі:

$$\begin{aligned} \tau_{opt.X} &= 279.2 \text{ с}; \quad \tau_{opt.Y} = 229.4 \text{ с}; \quad \tau_{opt.Z} = 368.7 \text{ с}; \\ \sigma_{A.min.X}^2 &= 9.6366 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^4; \quad \sigma_{A.min.Y}^2 = 10.1561 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^4; \quad \sigma_{A.min.Z}^2 = 11.3729 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^4; \\ \sigma_{A.min.X} &= 3.1043 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{с}^2; \quad \sigma_{A.min.Y} = 3.1869 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{с}^2; \quad \sigma_{A.min.Z} = 3.3724 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{с}^2. \end{aligned}$$

Таким чином, всі розраховані оптимальні значення часу усереднення потрапляють в діапазон (40÷400) с, отриманий в роботі [12] як діапазон мінімальних значень кривих відхилення Алана на ділянці з нульовим нахилом. Для даного часу усереднення для кожної осі акселерометра за визначеними коефіцієнтами варіації Алана обчислено мінімальні дисперсії та СКВ похибок оцінювання постійних складових при їх знаходженні шляхом усереднення.

Висновки

1. Встановлено зв'язок варіації Алана з дисперсією похибки оцінювання постійної складової вихідного сигналу інерціального сенсора, отриманої при усередненні.
2. Показано, що за визначених умов варіація Алана збігається з дисперсією похибки оцінювання постійної складової. Це дозволяє за допомогою варіації Алана, нечутливої до наявності постійної складової, оцінювати мінімальне значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення та визначати оптимальний час усереднення, що є важливим при калібруванні інерціальних сенсорів.
3. За наведеною методикою, основою на використанні варіації Алана, розроблено та протестовано спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислення варіації Алана за результатами обробки високочастотної інформації інерціальних сенсорів (акселерометрів та гіроскопів) при тривалих запусках з подальшою поліноміальною апроксимацією.
4. Проведено оцінки шумових складових вихідних сигналів МЕМС акселерометрів типу Gemini CAS211/291 в трьох запусках з подальшим визначенням часу усереднення для кожної

осі акселерометра та обчисленням мінімальних дисперсій та СКВ похибок оцінювання постійних складових при їх знаходженні шляхом усереднення.

5. В подальшому при проведенні досліджень точнісних характеристик навігаційних приладів і пристроїв на підприємствах галузі приладобудування пропонується разом з класичними методами статистичної обробки використовувати метод варіації Алана як ефективний спосіб ідентифікації структури шумів в каналі засобу вимірювання.

Перелік використаних джерел:

1. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С.А. Прохорова. – Самара : СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
2. Степанов О.А. Введение в теорию фильтрации / О.А. Степанов. – СПб. : ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – 417 с. – (Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации : в 2-х ч.; Ч. 2).
3. IEEE Std 1431-2004. Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. – IEEE, 2004. – 78 p.
4. Сирая Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения / Т.Н. Сирая // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 2. – С. 29-36.
5. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации / О.А. Степанов. – СПб. : ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 370 с.
6. Применение методов нелинейной фильтрации в задачах построения моделей ошибок измерителей и погрешностей карты / А.В. Моторин [и др.] // Материалы ХХІХ конференции памяти Н.Н. Острякова. – СПб. : ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С. 293-302.
7. Кробка Н.И. Дифференциальные методы идентификации структуры шумов гироскопов / Н.И. Кробка // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1 (72). – С. 59-77.
8. Allan Variance Analysis on Error Characters of MEMS Inertial Sensors for an FPGA-Based GPS/INS System / X. Zhang [et al.] // Proceeding of the International Symposium on GPS/GNSS.– Tokyo, Japan, 11-14 November 2008. – P. 127-133.
9. IEEE Std 952-1997. Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. – IEEE, 1997. – 77 p.
10. Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханического гироскопа // С.Г. Кучерков [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2003. – № 2 (41). – С. 98-104.
11. ALLAN VARIANCE SOFTWARE [Electronic resource]: [Web site]. – Electronic data. – Mode of access: www.alamath.com. – Screen title.
12. Rudyk A.V. Analysis of the errors of MEMS accelerometers by the Allan variation method / A.V. Rudyk // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2017. – № 1. – С. 100-109. – (Серія : Технічні науки).
13. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

References:

1. Prokhorov S.A. Prikladnoi analiz sluchainykh protsessov [Applied analysis of random processes]. Samara, SNTs RAN Publ., 2007. 582 p. (Rus.)
2. Stepanov O.A. Osnovy teorii otsenivaniia s prilozheniiami k zadacham obrabotki navigatsionnoi informatsii. Ch. 2. Vvedenie v teoriuu fil'tratsii [Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information. Part 2. Introduction to the theory of filtration]. St. Petersburg, ОАО «Kontsern «TsNII «Elektropribor» Publ., 2012. 417 p. (Rus.)
3. IEEE Std 1431-2004. Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. IEEE Publ., 2004. 78 p.
4. Siraia T.N. Variatsiia Allana kak otsenka pogreshnosti izmereniia [Allan's variation as an estimate of measurement error]. Giroskopiia i navigatsiia – Gyroscopy and navigation, 2010, no.2, pp. 29-36. (Rus.)
5. Stepanov O.A. Primenenie teorii nelineinoi fil'tratsii v zadachakh obrabotki navigatsionnoi informatsii [Application of the theory of nonlinear filtration in problems of processing navigation information]. St. Petersburg, ОАО «Kontsern «TsNII «Elektropribor» Publ., 2003. 370 p. (Rus.)
6. Motorin A.V., Stepanov O.A., Vasil'ev V.A., Toropov A.B. Primenenie metodov nelineinoi fil'tratsii v zadachakh postroeniia modelei oshibok izmeritelei i pogreshnostei karty [Application

- of methods of nonlinear filtering in problems of constructing models of errors in measuring devices and errors in the map]. Abstracts of XXIX konferentsii pamiati N.N. Ostriakova. – St. Petersburg, OAO «Kontsern «TsNII «Elektropribor» Publ., 2010, pp. 293-302. (Rus.)
7. Krobka N.I. Differential'nye metody identifikatsii struktury shumov giroskopov [Differential methods for identifying the noise structure of gyroscopes]. Giroskopiia i navigatsiia – Gyroscopy and navigation, 2011, no.1(72), pp. 59-77. (Rus.)
 8. Zhang X., Li Y., Mumford P., Rizos C. Allan Variance Analysis on Error Characters of MEMS Inertial Sensors for an FPGA-Based GPS/INS System. Proceeding of the International Symposium on GPS/GNSS. – Tokyo, Japan, 11-14 November 2008, pp. 127-133.
 9. IEEE Std 952-1997. Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. – IEEE Publ., 1997. 77 p.
 10. Kucherkov S.G., Lychev D.I., Skalon A.I., Chertkov L.A. Ispol'zovanie variatsii Allana pri issledovanii kharakteristik mikromekhanicheskogo giroskopa [The use of Allan's variation in the study of the characteristics of a micromechanical gyroscope]. Giroskopiia i navigatsiia – Gyroscopy and navigation, 2003, no.2(41), pp. 98-104. (Rus.)
 11. ALLAN VARIANCE SOFTWARE Available at: www.alamath.com (accessed 15 April 2016).
 12. Rudyk A.V. Analysis of the errors of MEMS accelerometers by the Allan variation method. Visnik Zhitomir'skogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences, 2017, no.1, pp. 100-109.
 13. Granovskii V.A., Siraia T.N. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereni-iakh [Methods of processing experimental data in measurements]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Древецький
д-р техн. наук, проф., НУВГП

Стаття надійшла 19.08.2017

УДК 004.056.55:004.421.5

© Хлєстова О.А.¹, Левицька Т.А.²

ІНТЕРАКТИВНЕ НАВЧАННЯ ПИТАННЯМ ЕКОЛОГІЇ НА ОСНОВІ ВЕБ-КВЕСТУ

У статті розглядаються питання використання прийомів і методик інтерактивного навчання для вивчення шляхів вирішення екологічних проблем, дослідження ролі антропогенного чинника у зміні якості навколишнього середовища. В роботі запропоновано використання інноваційної технології навчання у вигляді веб-квесту шляхом створення інформаційного простору для вирішення екологічних проблем, розроблений поетапний план організації та проведення веб-квесту. Детально описана технічна частина реалізації проекту «веб-квест», що включає вибір інструментів і мови програмування, обраний і запропонований сучасний ряд інформаційних технологій, таких як Node.js, React, MongoDB. Показано, що технологія веб-квесту, використовуючи інформаційні ресурси Інтернет і інтегруючи їх в освітній процес, допомагає ефективно вирішувати цілий ряд практичних і соціальних завдань, дозволяє підвищити загальну поінформованість населення, вибрати для подальшої реалізації заходи щодо захисту навколишнього середовища, адаптації до змін клімату внаслідок антропогенної діяльності.

Ключові слова: веб-квест, зміни клімату, освітній простір, інтернет-ресурси.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, helga26122016@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, tlevicky@gmail.com