

О. В. Збруцький¹, професор, д.т.н., В. Ю. Трунов², асистент

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ У СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ КІЛЬКОХ ОДНОТИПНИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

En

The purpose of the study is to develop a method for reducing the random error of MMGs by simultaneously using multiple sensors by jointly processing their output signals. The results of the experimental study of the characteristics of the zero signal of the micromechanical gyroscope are presented. The output signal of the micromechanical angular velocity sensor is presented as a set of useful signal and white noise (random component). To increase the informativeness of the study of the output signal, their centering (compensation of the constant component) and integration were performed. In order to study the characteristics, realizations were made simultaneously with 7 micromechanical gyroscopes. Received 9 implementations of the zero signal of the sensor group. They indicate an increase in the variance of the integrated highly noisy signal. The results of sensor signal processing are presented in two methods. The first method of complex processing of a group of sensors with simultaneous removal of a signal from all at the same time, the second - in turn, the capture of a useful signal from two micromechanical gyroscopes. It is shown that statistical processing of the output signals of 7-10 micromechanical gyroscopes allows to reduce the average value of a random error and its standard deviation, ie to increase the measurement accuracy by 1.5 orders of magnitude. The method of increasing the accuracy of micromechanical angular velocity sensors by step-by-step paired complex processing of their output signal, which consists in two-step observation and approximation and correction of the output signal and measurement of angular velocity (input value) and complex (pair-wise) steam The method improves the accuracy of micromechanical gyroscopes by 10 times. The statistical characteristics of the signal are established. The efficiency of complex signal processing of the sensor group is shown to reduce the random component of the error.

Ru

Приводятся результаты экспериментального исследования характеристик нулевого сигнала микромеханического гироскопа. Установлены статистические характеристики сигнала. Показана эффективность комплексной обработки сигналов группы датчиков для уменьшения случайной составляющей погрешности.

Вступ

Мікромеханічний гіроскоп (ММГ) знайшов широке застосування у системах орієнтації і навігації безпілотних рухомих об'єктів. Зашумленість

¹ КПП ім. Ігоря Сікорського

² КПП ім. Ігоря Сікорського

вихідного сигналу веде до швидкого накопичення похибки під час його інтегрування в алгоритмах орієнтації. Це обмежує задачу ММГ у таких системах лише короткочасним забезпечення режиму автономної орієнтації. Відомі дослідження температурної, технологічної похибок, які мають детермінований характер, розглянуті методи їх компенсації [1, 2, 3]. У [4] розглянута випадкова похибка нульового сигналу ММГ, але не пропонуються шляхи її компенсації.

Постановка задачі

Метою дослідження є розробка способу зменшення випадкової похибки ММГ одночасним використанням декількох датчиків шляхом спільної обробки їх вихідних сигналів.

Статистичні характеристики вихідного сигналу мікромеханічних датчиків кутової швидкості

Вихідний сигнал ММГ (рис. 1) представимо як сукупність корисного сигналу та білого шуму (випадкової складової). Дослідимо статистичні характеристики випадкової складової.

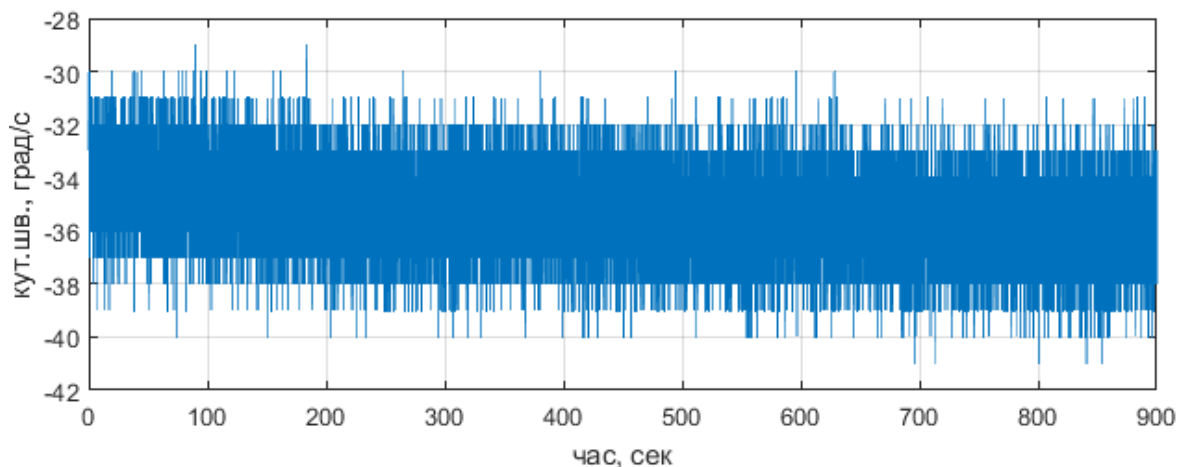


Рис. 1. Вихідний сигнал ММГ

Для підвищення інформативності наступного дослідження вихідного сигналу проведемо їх центрування (компенсація постійної складової) [5] та інтегрування.

Для дослідження характеристик знімалися реалізації одночасно із 7 мікромеханічних гіроскопів (рис. 2, криві 1-7). Отримано 9 реалізацій нульового сигналу групи датчиків (рис. 3, криві 1-9). Вони свідчать про наростання дисперсії проінтегрованого сильно зашумленого сигналу.

Середнє значення проінтегрованих нульових сигналів групи із 7-ми датчиків (рис. 2, крива 8) порівняно із аналогічними сигналами окремих ММГ (криві 1-7) має на порядок меншу величину. Для перевірки дос-

товірності та повторюваності такого результату проведено 9 циклів вимірювання нульових сигналів групи ММГ із використанням 7-ми датчиків (рис. 3). Очевидно швидке наростання дисперсії як для окремого циклу (криві 1-9), так і для всієї групи циклів (крива 10). Середнє значення нульового сигналу у 9-ти циклах вимірювань (рис. 3, крива 10) показує, що процес наближається до ергодичного на малому проміжку часу. Середнє квадратичне відхилення (СКВ) процесу характеризується кривою 11 (рис. 3).

Для більш точного дослідження статистичних характеристик на короткому проміжку часу побудуємо кореляційну функцію випадкового осередненого сигналу після інтегрування (рис. 3, крива 10 із СКВ крива 11) за допомогою автокореляційної функції (АКФ) $xcorr(x)$ у пакеті *Matlab* [6] (рис. 4).

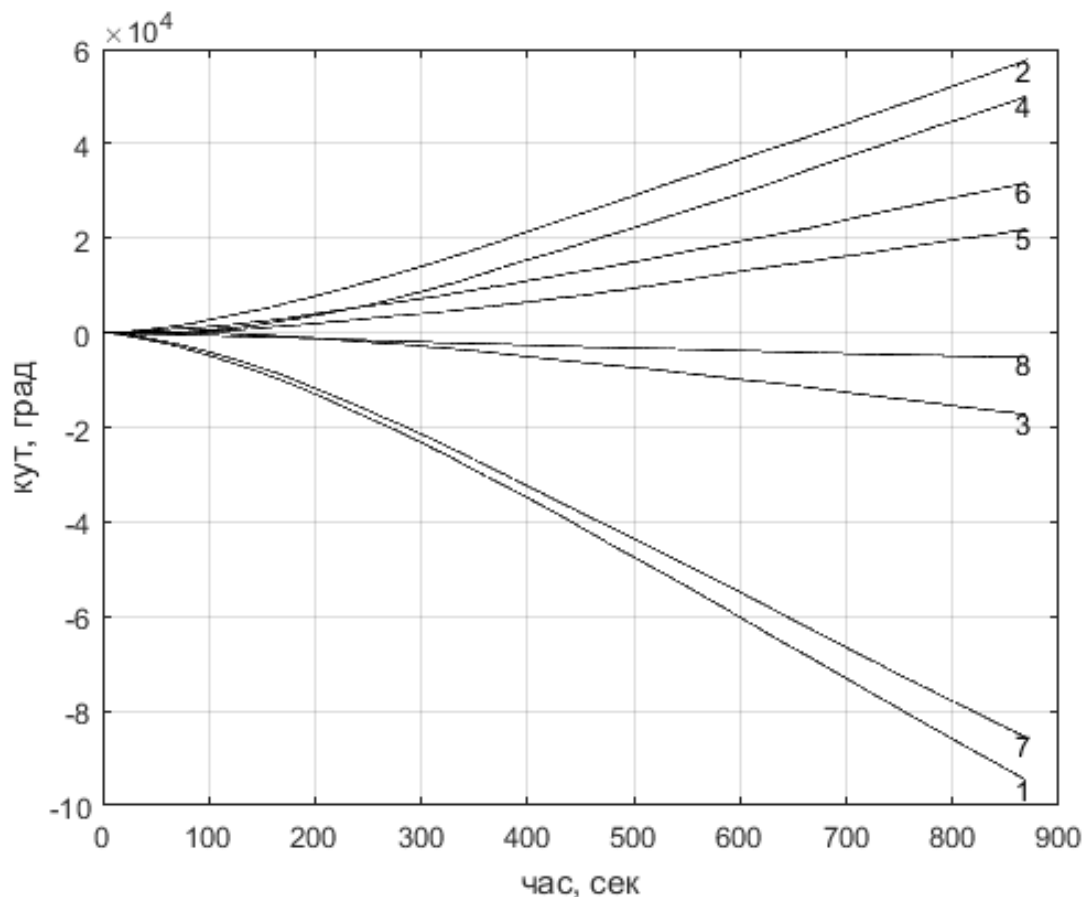


Рис. 2. Проінтегровані сигнали ММГ – криві 1-7, крива 8 – їх осереднення

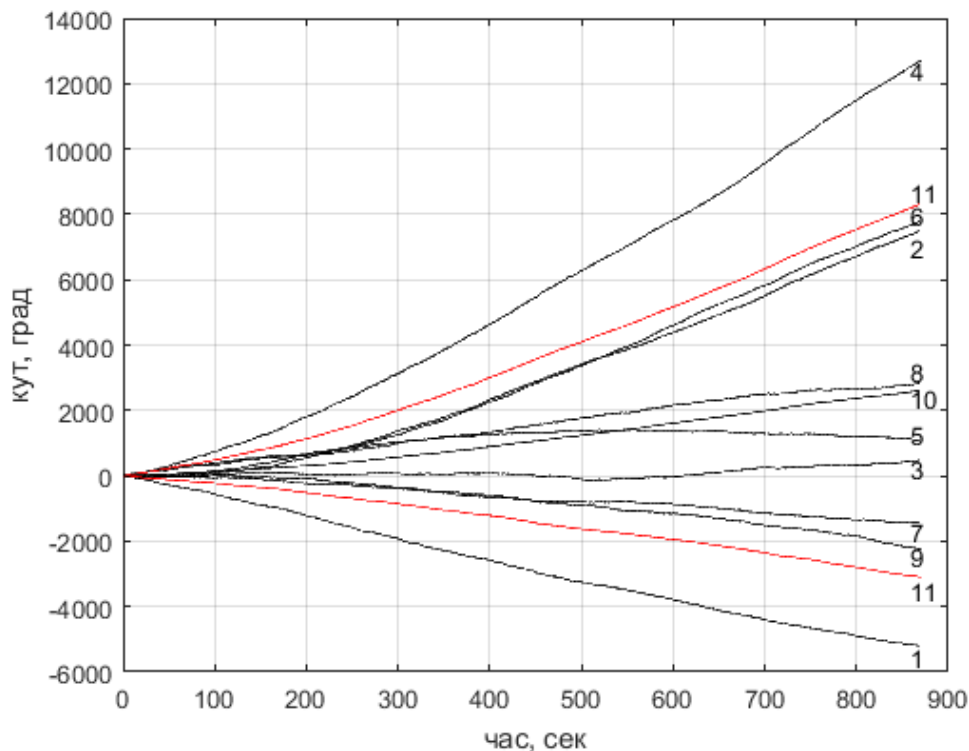


Рис. 3. Середні значення нульового сигналу блока ММГ у 9 циклах (криві 1-9) та середнє значення 9-ти циклів (крива 10) із СКВ (крива 11)

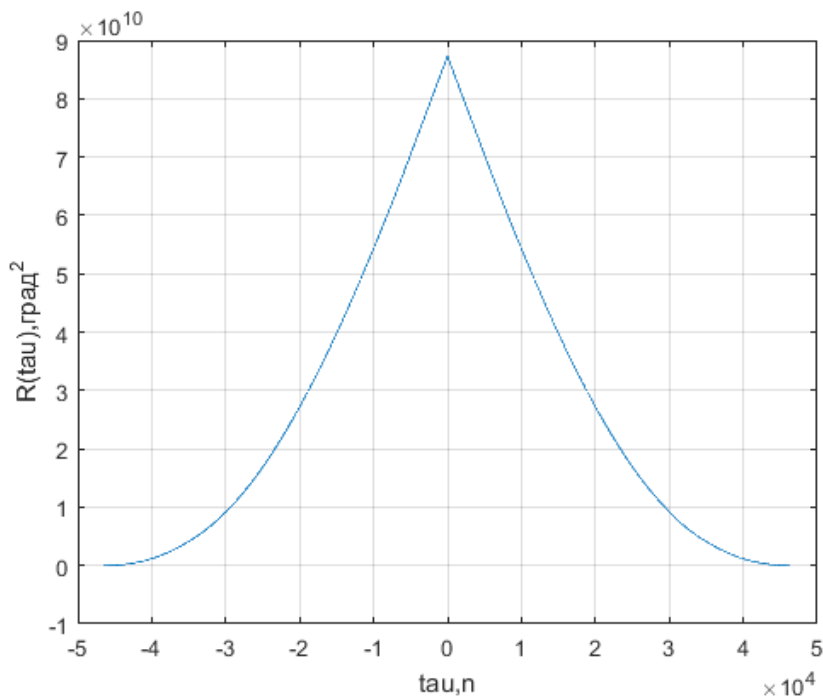


Рис. 4. АКФ середнього значення випадкового процесу 9-ти реалізацій

Отримана автокореляційна функція (рис. 4) відповідає випадковому процесу, який наближається до стаціонарного ергодичного процесу [5].

АКФ (а) і спектр (б) вихідного центрованого сигналу ММГ показані на рис. 5.

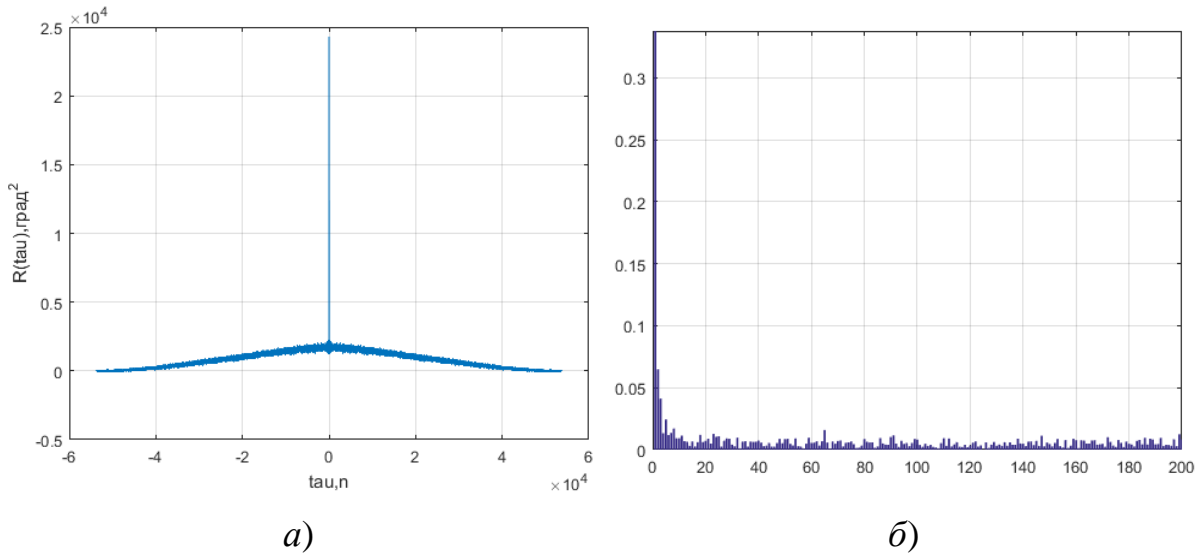


Рис. 5. АКФ (а) і спектр (б) вихідного центрованого сигналу ММГ

Автокореляційна функція непроінтегрованого вихідного сигналу R_1 (рис. 5, а) та його спектральна характеристика можуть бути описані відповідно формулами:

$$R_1 = \frac{N\mu}{2} e^{-|\tau|\mu} + N\delta(\tau)$$

$$S_1 = \frac{\mu^2 N}{\mu^2 + w^2} + N.$$

Маючи R_1 за відомими співвідношеннями отримаємо аналітичний вираз кореляційної функції (R_2) та побудуємо АКФ і спектр для проінтегрованого сигналу (рис. б).

$$R_2 = \int_0^{\infty} w(\eta) d\eta \int_0^{\infty} w(\lambda) R_1(\tau - \eta + \lambda) d\lambda;$$

$$D_{2=R_2(0)} = \int_0^{\infty} w(\eta) d\eta \int_0^{\infty} w(\lambda) R_1(\tau - \eta + \lambda) d\lambda;$$

$$w(t) = k;$$

$$R_1(\lambda - \eta) = \frac{kN\mu}{2} e^{-|\lambda-\eta|\mu} + N\delta(\tau) = \frac{kN\mu}{2} e^{(\lambda-\eta)\mu} + N\delta(\tau);$$

$$\int_0^{\infty} R_1(\lambda - \eta) d\lambda = \frac{1}{\mu} e^{\eta\mu} + Nt;$$

$$D_2 = R_2(0) = \frac{k^2 N}{2} e^{\mu t} + Nt.$$

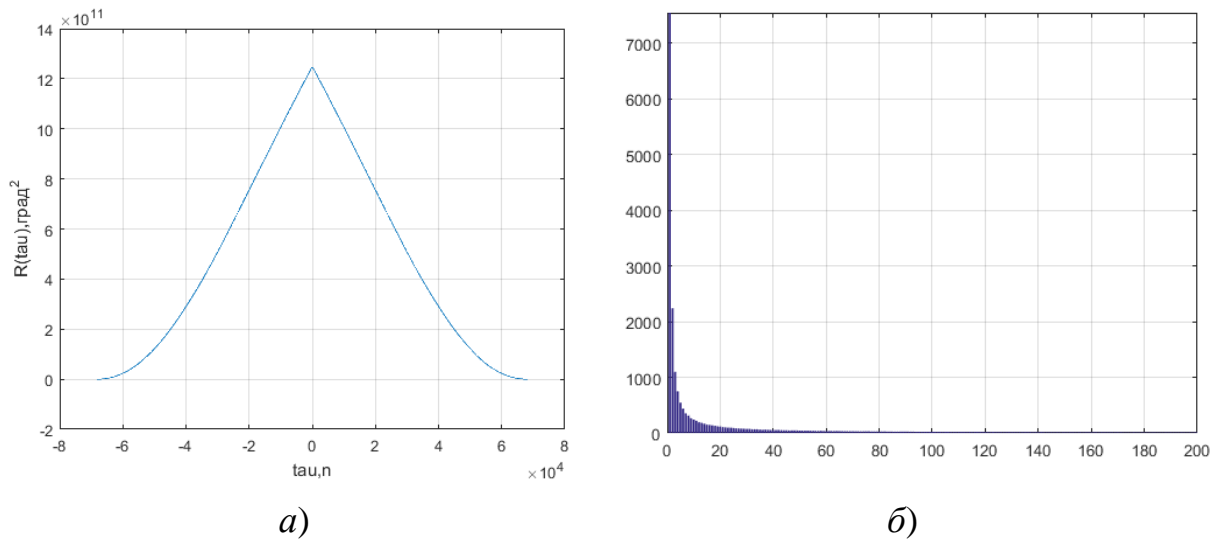


Рис. 6. АКФ (а) і спектр (б) вихідного проінтегрованого сигналу ММГ

Графіки АКФ (а) та спектральної (б) характеристики показані на рис. 7. Виходячи із отриманих формул, теоретичні дані відповідають експериментальним результатам.

Інтегрована система зйому даних

Другим варіантом комплексного використання ММГ може бути їх попарне використання. Суть цього полягає у тому, що на першому інтервалі ідентифікується похибка першого із датчиків. На другому інтервалі визначається скореговане значення вимірюваної кутової швидкості та ідентифікується похибка другого датчика. Далі цей цикл повторюється. Результат роботи алгоритму показаний на рис. 7. Із нього видно відсутність постійно наростаючої похибки яка була б під час роботи одного датчика.

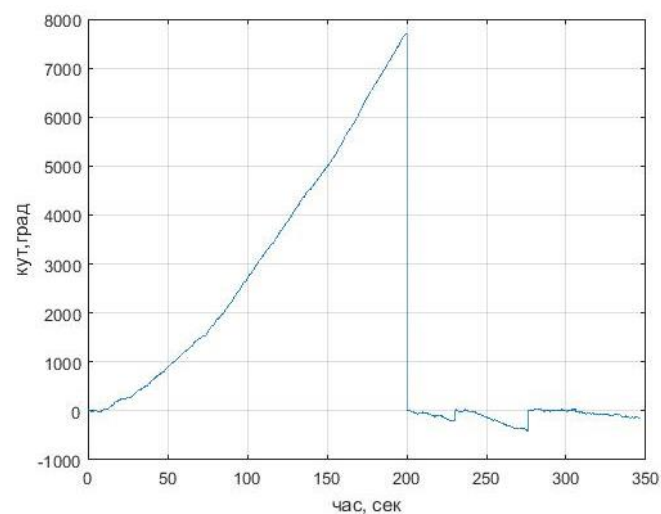


Рис. 7. Зображення роботи інтегрованої системи зйому даних

Висновки

Запропоновані методи спільної обробки вихідного сигналу групи ММГ та попарної обробки сигналів двох датчиків може суттєво підвищити точність гіроскопів.

Список використаної літератури

1. Apostolyuk, V. (2016), “ Coriolis vibratory gyroscopes ”, *Springer*, pp. 117.
2. Джашитов, В. Э., Панкратов, В. М., Лестев, А. М. and Попова, И. В. (2000), “Temperature and technological errors of micromechanical gyroscopes” [Temperaturnye i tehnologicheskie pogreshnosti mikromehanicheskikh giroskopov], *Materials of the VII St. Petersburg International Conf. on integrated navigation systems* [Materialy VII Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konf. po integrirovannym navigacionnym sistemam], VII St. Petersburg International Conf. on integrated navigation systems, Saint-Petersburg, Russia, 29-31 May, pp. 60-71.
3. Джашитов, В. Э., Лестев, А. М., Панкратов, В. М. and Попова, И. В. (1999), “ Influence of temperature and technological factors on the accuracy of micromechanical gyroscopes” [Vlijanie temperaturnyh i tehnologicheskikh faktorov na tochnost' mikromehanicheskikh giroskopov], *Гироскопия и навигация*, no. 3. pp. 3-16.
4. Кучерков, С. Г., Лычѳв, Д. И., Скалон, А. И. and Чертков, Л. А. (2002), “ The use of Allan's variations in the study of the characteristics of a micromechanical gyroscope on a rotary bench” [Ispol'zovanie variacij Allana pri issledovanii harakteristik mikromehanicheskogo giroskopa na povorotnom stende], *Гироскопия и навигация*, no. 4, pp. 39.
5. Мокін, Б. І., Мокін, В. Б. and Мокін, О. Б. (2010), “ Mathematical methods for identification of dynamic systems” [Matematy`chni metody` identy`fikaciyi dy`namichny`x sy`stem], *Навчальний посібник ВНТУ*, Vinica, Ukraine.