

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.084.6:531.383

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).34-43

Поступила в редакцию / Received 30.01.2025

ГРНТИ 29.03.35+30.17.19

Специальность ВАК 1.3.4.

Принята к публикации / Accepted 28.03.2025

Научная статья

ОЦЕНКА ЗАШУМЛЁННОСТИ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КАНАЛА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

Павлов Д. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. В данной статье приведено исследование составляющих погрешностей выходного сигнала в гироскопическом канале малогабаритной инерциальной системы ориентации и навигации. Исследование шумовых составляющих проводилось на четырёх экземплярах датчиков угловой скорости. Гироскопический канал данной системы ориентации и навигации реализуется на базе применения MEMS-датчика угловой скорости ТГ–100 фирмы «Лаборатория микроприборов». Выполнена оценка спектрального состава случайных составляющих погрешностей датчика угловой скорости с применением метода вариации Аллана при комнатной температуре. Получены коэффициенты интенсивностей различных типов шумов в выходном сигнале датчика угловой скорости и проведено сравнение с его паспортными характеристиками. Проведена оценка накопления ошибки в определении широты, долготы и пути гироскопического канала инерциальной системы ориентации и навигации.

Ключевые слова: MEMS-гироскоп, датчик угловой скорости, погрешности, шум, вариация Аллана, случайный процесс, интенсивность шумов, гироскопический канал.

Для цитирования: Павлов Д. В. Оценка зашумлённости гироскопического канала инерциальной системы ориентации и навигации // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 34–43. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).34-43

Research Article

NOISE ASSESSMENT OF THE GYROSCOPIC CHANNEL OF THE INERTIAL ORIENTATION AND NAVIGATION SYSTEM

Pavlov D. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. This article presents a study of the error components of the output signal in the gyroscopic channel of a small-sized inertial orientation and navigation system. The study of noise components was carried out on four copies of angular velocity sensors. The gyroscopic channel of this orientation and navigation system is implemented using the TG-100 MEMS angular velocity sensor from the Laboratory of Micro-Devices. The spectral composition of the random error components of the angular velocity sensor is estimated using the Allan variation method at room temperature. The intensity coefficients of various types of noise in the output signal of the angular velocity sensor are obtained and compared with its standard characteristics. The accumulation of errors in determining the latitude, longitude and path of the gyroscopic channel of the inertial orientation and navigation system is estimated.

Keywords: MEMS gyroscope, angular velocity sensor, error limits, noise, Allan variation, random process, noise intensity, gyroscopic channel.

For citation: Pavlov D. V. Noise assessment of the gyroscopic channel of the inertial orientation and navigation system // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 34–43. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).34-43

Введение

Инерциальные системы ориентации и навигации (ИСОН) предназначены для определения ориентации и местоположения объектов в инерциальном пространстве. В состав ИСОН входят такие инерциальные датчики, как акселерометр и гироскоп. Совокупность проекций выходных сигналов акселерометра на его чувствительные оси представляет собой акселерометрический канал измерений. Совокупность проекций выходных сигналов гироскопа на его чувствительные оси представляет собой гироскопический канал измерений. Кроме этих датчиков ИСОН дополняются магнетометрами, барометрическими датчиками и температурными датчиками.

Выходные сигналы датчиков содержат систематическую и случайную составляющие погрешности. Систематическую составляющую довольно просто идентифицировать методом калибровки на измерительных стендах. К такой систематической погрешности может относиться, например, детерминированный температурный дрейф нуля, постоянная ошибка при включении датчика и др. Случайные составляющие погрешностей сложнее идентифицировать. К таким погрешностям относятся, например, дрейф нуля, случайное блуждание угла, фликкер-шум и др.

В целом, идентификация модели погрешностей датчиков и определение ее параметров представляет собой очень важной задачей, которая решается при их калибровке в ходе проводимых испытаний. Для изучения случайных составляющих погрешностей и построения их моделей используются хорошо известные методы определения спектральных плотностей мощностей и корреляционных функций [1, 2]. Но в последнее время для задачи идентификации случайных составляющих выходных сигналов инерциальных датчиков широкое распространение получил метод вариация Аллана [3–7].

В данной работе рассмотрен вариант построения гироскопического канала неортогональной ИСОН [8] на базе четырёх ДУС ТГ–100 производства фирмы «Лаборатория микроприборов». Разработана модель ошибок гироскопического канала ИСОН. Проведено исследование выходного сигнала ДУС ТГ–100 и проведено сравнение с его паспортными данными. Получена оценка погрешности вычисления угловой скорости неортогональной ИСОН, характеризующая зашумлённость гироскопического канала.

Применение вариации Аллана для моделирования стационарных и нестационарных случайных процессов

Случайные процессы в каналах инерциальных измерителей могут быть стационарными и нестационарными [9, 10].

На рисунке 1 показана качественная картина стационарного и нестационарного случайного процесса (СП).

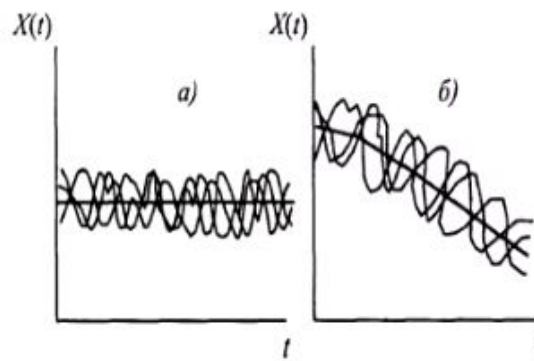


Рисунок 1. Случайные процессы:
а) стационарный СП; б) нестационарный СП

Метод вариации Аллана можно использовать для исследования как стационарных и нестационарных СП.

Например, в работе [2] рассмотрено применения вариации Аллана для смеси двух процессов: винеровского процесса и белого шума. Получены выражения зависимости оптимального времени осреднения τ_{opt} и дисперсии Аллана $\sigma_{(min)}^2$ от интенсивностей белого шума и винеровского процесса:

$$\tau_{opt} = \frac{\sqrt{3}\rho}{q}, \quad (1)$$

$$\sigma_{(min)}^2 = \frac{2\rho q}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

В выражениях ρ и q – коэффициенты интенсивностей шумов центрированного винеровского процесса и белого шума. Полученные в работе [2] выражения успешно можно использовать для разработки оптимальной фильтрации в каналах инерциальных датчиков.

Сам метод вариации Аллана основан на вычислении дисперсии разности соседних отклонений [5] центрированного СП. Центрированный случайный процесс – процесс с нулевым математическим ожиданием.

Для некоторой случайной последовательности θ_k ($k = 1, \dots, N$) вариация (дисперсия) Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ на интервале осреднения τ определяется как среднее дисперсий соседних пар данных θ_k и вычисляется по формуле [3]:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(M-2n)\tau} \sum_{k=1}^{M-2n} (\theta_{k+2n} - 2\theta_{k+n} + \theta_k)^2, \quad (3)$$

где $\tau = nT_0$ – время усреднения; T_0 – период дискретизации;

$n = 1, 2, 3 \dots n_{max}$; $n_{max} \leq \frac{M-1}{2}$;

$\theta_k = \int_0^{kT_0} \omega(t)dt$ – значение k – го значения угла;

$\omega(t)$ – измеряемая ДУСом угловая скорость.

При частоте обновления данных ИСОН $f = 200$ Гц, $T_0 = 0,005$ с.

Дисперсия $\sigma_A^2(\tau)$ связана со спектральной плотностью мощности шума $P(f)$ соотношением [3]:

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

На основе научных работ [3, 4] и ряда ранее проведённых экспериментальных исследований выходных сигналов инерциальных измерителей в рамках предприятия ЗАО «ЭЛСИ» был идентифицирован основной состав шумов MEMS-гироскопов (или ДУС). Для идентификации интенсивностей шумов использовался аппроксимирующий полином $pA2(\tau)$:

$$\sigma_A^2(\tau) \approx p_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}. \quad (5)$$

Коэффициенты R , K , B , N , Q полинома (5) характеризуют интенсивность отдельных шумовых составляющих выходного сигнала ДУС. Определение их числовых значений выполняется по методу наименьших квадратов (МНК) [7].

Для анализа шумовых составляющих выходного сигнала любого измерителя (в данном случае ДУС) проводится построение графика в логарифмическом масштабе зависимости $\sigma_A(\tau)$. Здесь $\sigma_A(\tau) = \sqrt{\sigma_A^2(\tau)}$.

В методе вариации Аллана предполагается выделение семи составляющих шумов измерений [4–6], которые можно оценивать по характерным наклонам $\sigma_A(\tau)$ -графика (рисунок 2).



Рисунок 2. Общий вид кривой Аллана с характерными наклонами

Оценка составляющих интенсивностей шумов гироскопического канала

Для реализации гироскопического канала ИСОН рассмотрена модель ДУС ТГ–100 производства фирмы «Лаборатория микроприборов». Эта модель выбрана по критерию высоких точностных характеристик подобных моделей в России, при которых сохраняются компактные размеры датчика. На рисунке 3 показан общий вид и размеры ДУС ТГ–100.

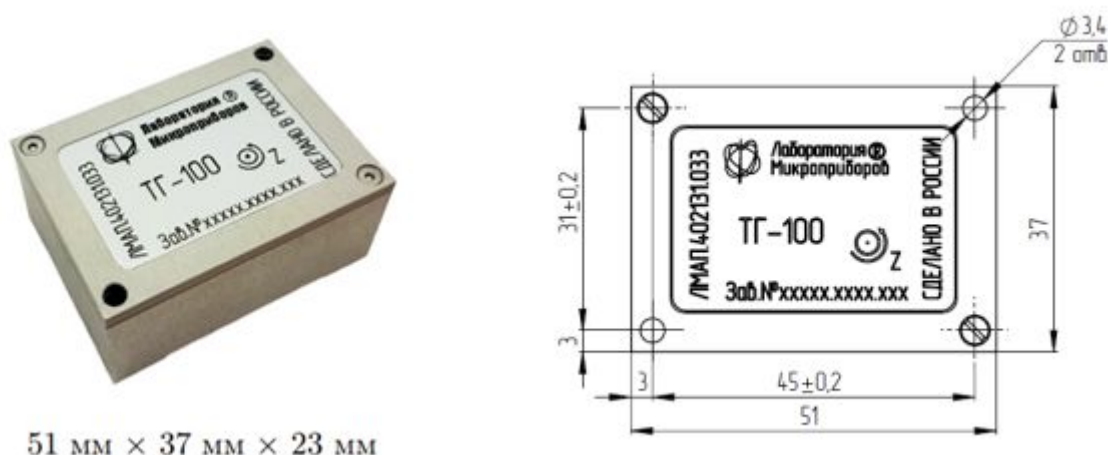


Рисунок 3. Общий вид и габаритные размеры модели ДУС ТГ–100

В таблице 1 указаны характеристики ТГ–100.

Таблица 1. Основные характеристики ДУС ТГ–100

Параметр	Номинальные значения	Условия
Диапазон измерения угловой скорости	± 100 град/с	
Полоса пропускания	50 Гц	По уровню -3Дб
Случайная составляющая шума выходного сигнала	0,05 град/ $\sqrt{ч}$	
Масштабный коэффициент	20 мВ/град/с	При +25°C
Нестабильность смещения нуля	2 град/ч	По диаграмме Аллана при +25°C
Нелинейность статической характеристики	0,15%	Относительно диапазона измерения
Погрешность масштабного коэффициента	10%	В рабочем диапазоне температур
Погрешность смещения нуля	$\pm 1,5$ град/с	В рабочем диапазоне температур
Напряжения питания	5 В $\pm$ 4%	
Ток потребления	< 100 мА	

На рисунке 4 показан пример графика вариации Аллана для выходного сигнала одного из ДУС с наклонными линиями, характеризующие состав шумов.

Проводилось исследование шумов у четырёх экземпляров ДУС одной модели (ТГ–100). Полученные коэффициенты интенсивностей шумов при комнатной температуре для 4 экземпляров ДУСов сведены в таблицу 2.

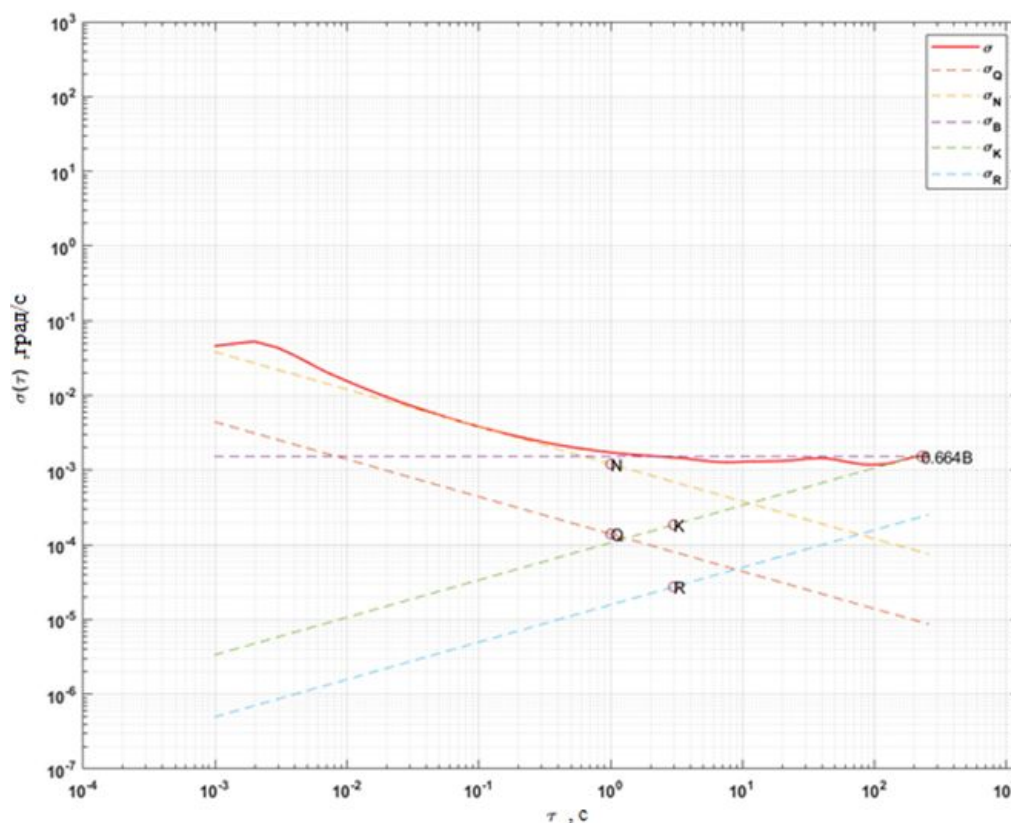


Рисунок 4. График кривой Аллана $\sigma_A = \sigma_A(\tau)$ с наклонными, представленные для одного из экземпляров акселерометра ДУС1 модели ТГ–100: $\sigma_A = \sigma_A(\tau)$ – результирующее среднеквадратическое отклонение (СКО) Аллана; τ – время усреднения, с; σ_Q – шум квантования; σ_N – случайное угловое блуждание; σ_B – нестабильность смещения нуля; σ_K – случайное блуждание угловой скорости; σ_R – систематический уход угловой скорости

Таблица 2. Сведённые результаты значений коэффициентов интенсивностей шумов четырёх экземпляров ДУС при комнатной температуре.

Экземпляры ДУС ТГ–100	Коэффициенты интенсивностей шумов				
	$ Q \cdot 10^{-4}$, град	$ N \cdot 10^{-4}$, град/ $\sqrt{с}$	$ B \cdot 10^{-4}$, град/с	$ K \cdot 10^{-4}$, град/с/ $\sqrt{с}$	$ R \cdot 10^{-4}$, град/с /с
ДУС 1	-	8,9	5,9	0,15	-
ДУС 2	-	8,8	5,3	0,11	-
ДУС 3	0,001	8,8	5,8	0,09	-
ДУС 4	-	8,6	5,3	0,12	-

Оценка уровня зашумлённости гироскопического канала ИСОН

Согласно полученным данным в таблице 2, шумом квантования $|Q|$ в трёх экземплярах ДУС можно пренебречь. По графику (рисунок 3) это означает, в результирующей кривой Аллана $\sigma = \sigma(\tau)$ отсутствует наклон графика, равный -1 в логарифмическом масштабе.

Шумами систематического ухода угловой скорости также можно пренебречь для трёх экземпляров ДУС.

Согласно паспортным данным заявленная нестабильность смещения нуля у ДУС1 и ДУС3 должна быть 2 град/ч. Для ДУС1: $|B_1| = 5,9 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 \approx 2,12$ град/ч. Для ДУС 3: $|B_3| = 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 \approx 2,09$ град/ч. То есть оценка интенсивности данного шума показала значение немного выше, чем заявлено по паспортным данным.

Случайная составляющая выходного сигнала (шум углового блуждания) по паспортным данным составляет 0,05 град/ $\sqrt{ч}$. Но оценка методом вариации Аллана показывает, что каналы гироскопа немного зашумлены и имеют чуть большее значение интенсивности данной составляющей шума: $|N| = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \approx 0,053$ град/ $\sqrt{ч}$.

СКО ИСОН гироскопического канала определяется уравнениями [11]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\Delta\varphi}^{\Gamma}(t) &= \sigma_{\Sigma}^{\Gamma}(\cos(\omega_{\text{ш}}t) - 1), \\ \sigma_{\Delta S}^{\Gamma}(t) &= \frac{\sigma_{\Sigma}^{\Gamma}R_3}{\omega_{\text{ш}}}(\sin(\omega_{\text{ш}}t) - \omega_{\text{ш}}t), \\ \sigma_{\Delta\lambda}^{\Gamma}(t) &= -\frac{\sigma_{\Sigma}^{\Gamma}}{\omega_{\text{ш}}}(\sin(\omega_{\text{ш}}t) - \omega_{\text{ш}}t),\end{aligned}\tag{6}$$

где $\sigma_{\Delta\varphi}^{\Gamma}(t)$ – СКО гироскопического канала в определении широты;

$\sigma_{\Delta S}^{\Gamma}(t)$ – СКО гироскопического канала в определении пути;

$\sigma_{\Delta\lambda}^{\Gamma}(t)$ – СКО гироскопического канала в определении долготы;

$\omega_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{g}{R_3}}$ – частота Шулеровских колебаний;

$R_3 \approx 6,380 \cdot 10^6$ м – среднее значение радиуса Земли;

$g = 9,81 \frac{м}{с^2}$ – ускорение свободного падения;

$\sigma_{\Sigma}^{\Gamma} = \sigma_A^2(t)$;

$t = \tau$ – время накопления данных (время работы ИСОН на борту БПЛА).

На рисунках 5–7 показаны графики зависимости СКО определения широты, пути и долготы от времени работы ИСОН.

Заключение

В работе проведена оценка спектрального состава и интенсивности различных составляющих шума четырёх экземпляров ДУС ТГ–100 методом вариации Аллана. Выявлено, что в измерительных каналах ДУСов можно пренебречь шумом квантования и шумом систематического ухода угловой скорости.

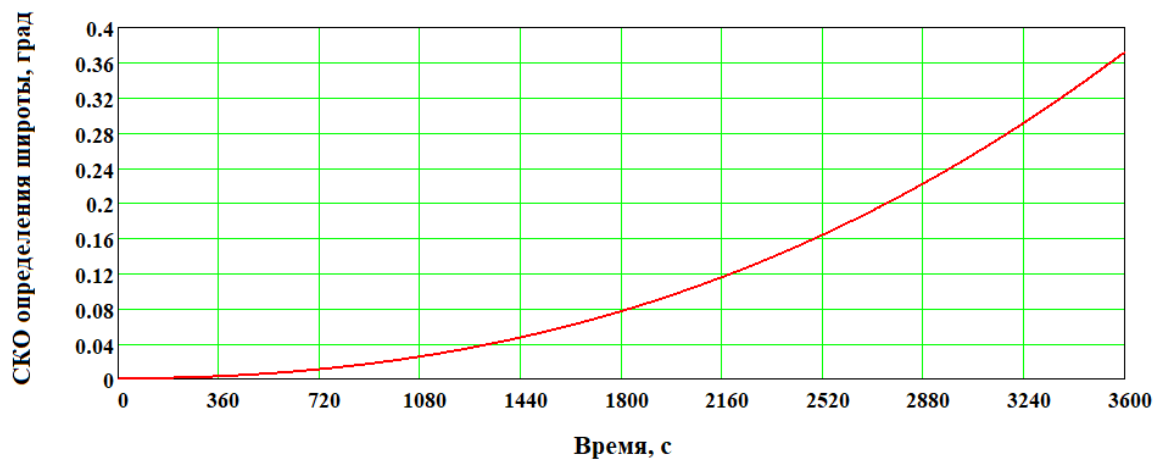


Рисунок 5. График зависимости СКО определения широты от времени

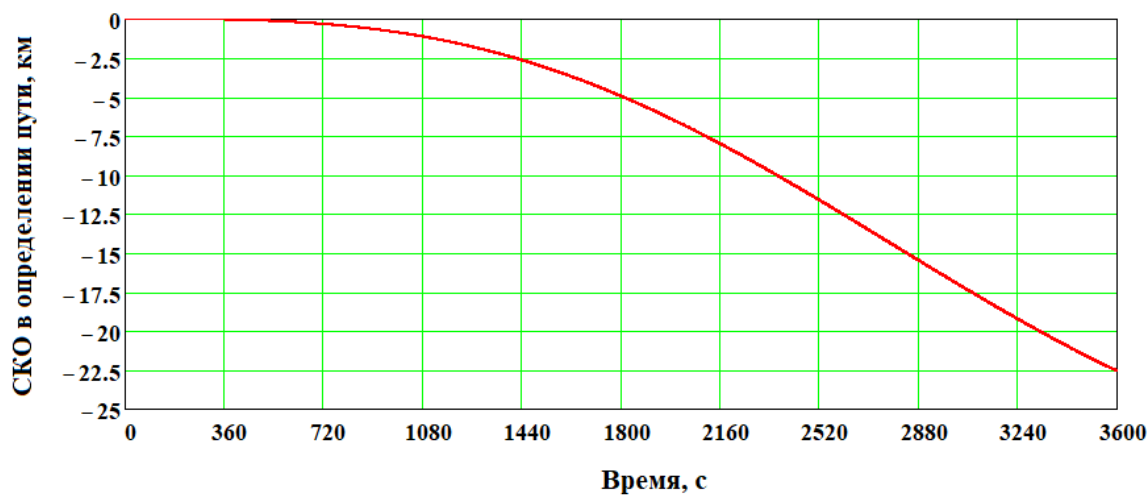


Рисунок 6. График зависимости СКО определения пути от времени

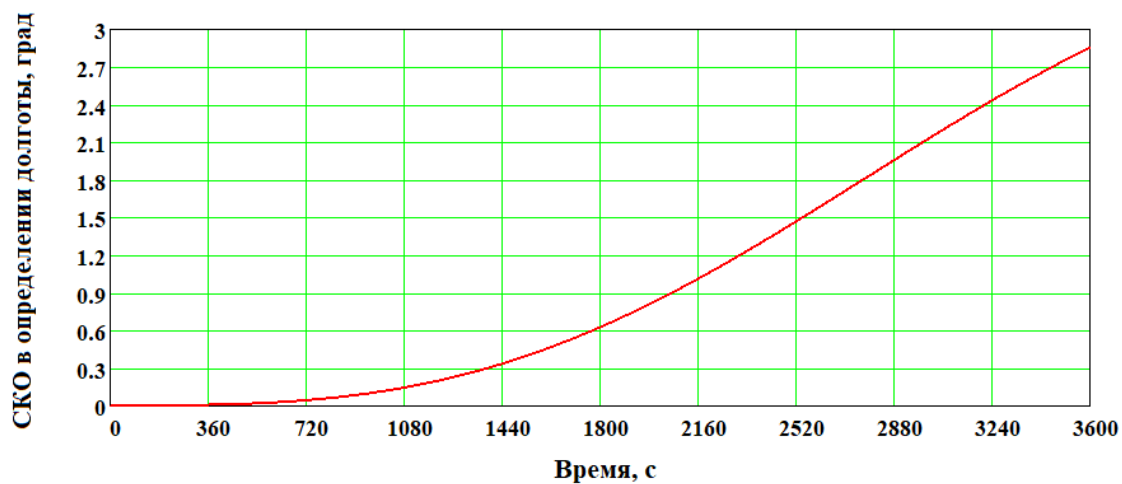


Рисунок 7. График зависимости СКО определения долготы от времени

Проведено сравнение с паспортными данными шумов ДУСов. Выявлено, что нестабильность смещения нуля у ДУС1 и ДУС3 на 6% и на 4,5% выше заявленных паспортных данных датчиков. Также шум углового блуждания оказался завышен максимум на 6% относительно заявленных данных по паспорту датчиков. Данные отклонения не являются критичными для систем ориентации и навигации среднего класса точности. Однако, для ИСОН высокого класса точности учёт этих отклонений от паспортных данных следует учесть в реализации Фильтра Калмана или других способов фильтрации.

Сделана оценка накопления ошибки определения широты, пути и долготы (рисунки 5-7) при времени полёта БПЛА 1ч. Таким образом, за 1 ч работы ИСОН накапливаются следующие значения ошибок: СКО широты $\sigma_{\Delta\varphi}^{\Gamma}(3600) \approx 0,37^{\circ}$; СКО пути $\sigma_{\Delta S}^{\Gamma}(3600) \approx 22,6$ км; СКО долготы $\sigma_{\Delta\lambda}^{\Gamma}(3600) \approx 3,9^{\circ}$. Полученные ошибки – результат вклада исследуемых шумов ДУСов в гироскопический канал (таблица 2). Таким образом, несмотря на применение точных датчиков ДУС ТГ–100, возникают серьёзные ошибки накопления. Таким образом, идентификация модели погрешностей датчиков и определение ее параметров представляет собой очень важной задачей, которая решается калибровкой в ходе проводимых испытаний. Кроме того, исследование состава шумов инерциальных датчиков позволяет идентифицировать интенсивность и тип шума. Определение типа и интенсивность шума помогает выявить его причину, что упрощает применение мер, направленных на повышения точности ИСОН.

Список литературы

1. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С. А. Прохорова. Самара: СНЦ РАН, 2007. 582 с.
2. Степанов О. А. Основы теории оценивания, с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 417 с.
3. Кучерков С. Г., Лычев Д. И., Скалон А. И., Чертков Л. А. Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2003. 2 (41). 98–104.
4. Лесников М. В., Ксендзов А. В. Способы вычисления дисперсии Аллана на примере датчика ADIS16407 // Молодой учёный. 2021. 23 (365). 97–100.
5. 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, Odaiba, Tokyo, Japan, 11–14 November 2008. Tokyo: Tokyo University of Marine Science and Technology, 2008. 127–133.
6. Сирая Т. Н. Статическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гироскопия и навигация. 2020. 28 (1). 3–18. DOI: 10.17285/0869-7035.0027
7. Pavlov D. V., Petrov M. N. Investigation and identification of the spectral composition of noise in the accelerometer channel of the navigation module // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1658. 012035. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012035

8. Павлов Д. В., Телина И. С., Самуйлова К. Д. Алгоритмическая модель системы ориентации и навигации со структурной избыточностью // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 363–378. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378
9. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва: Радио и связь, 1989. 656 с.
10. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. Москва: Радио и связь, 1982. 624 с.
11. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 278 с.

References

1. Applied analysis of random processes / ed. by S. A. Prokhorov. Samara: SSC RSA, 2007. 582 p. (In Russian).
2. Stepanov O. A. Fundamentals of the theory of estimation, with applications to the tasks of processing navigation information. Part 2. Introduction to the theory of filtration. Saint Petersburg: Central Research Institute "Electropribor", 2012. 417 p. (In Russian).
3. Kucherkov S. G., Lychev D. I., Skalon A. I., Chertkov L. A. The use of Allan variation in investigating characteristics of a micromechanical gyroscope // Gyroscopy and navigation. 2003. 2 (41). 98–104. (In Russian).
4. Lesnikov M. V., Ksendzov A. V. Methods for calculating the Allan dispersion using the example of the ADIS16407 sensor // Young Scientist. 2021. 23 (365). 97–100. (In Russian).
5. 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, Odaiba, Tokyo, Japan, 11–14 November 2008. Tokyo: Tokyo University of Marine Science and Technology, 2008. 127–133.
6. Siraya T. N. Static interpretation of the Allan variation as characteristics of measuring and navigation devices // Gyroscopy and navigation. 2020. 28 (1). 3–18. DOI: 10.17285/0869-7035.0027 (In Russian).
7. Pavlov D. V., Petrov M. N. Investigation and identification of the spectral composition of noise in the accelerometer channel of the navigation module // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1658. 012035. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012035
8. Pavlov D. V., Telina I. S., Samuilova K. D. Evaluation of the improvement of the accuracy of the orientation and navigation system with structural redundancy // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 363–378. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378 (In Russian).
9. Levin B. R. Theoretical foundations of statistical radio engineering. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989. 656 p. (In Russian).
10. Tikhonov V. I. Statistical radio engineering. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982. 624 p. (In Russian).
11. Matveev V. V., Raspopov V. Ya. Fundamentals of building free-form inertial navigation systems. Saint Petersburg: Central Research Institute "Electropribor", 2009. 278 p. (In Russian).

Информация об авторе

Павлов Денис Викторович – ассистент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-0461-6945, energidriver@mail.ru