

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

А.С. Болотнов

electsab@gmail.com

SPIN-код: 2102-2943

И.И. Фомин

vanyafofin@yandex.ru

SPIN-код: 4427-0800

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Рассмотрены преимущества использования метода вариации Аллана при исследовании шумовых составляющих выходных сигналов лазерных гироскопов бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Приведены графики исследования точностных характеристик кольцевого лазерного гироскопа ГЛ-2Д с использованием программы RWCalc. Даны результаты вычисления значений шумовых составляющих выходного сигнала кольцевого лазерного гироскопа с использованием алгоритма вариации Аллана. Определены источники шумовых составляющих, возникающих при измерениях угловой скорости с помощью фотодетектора, установленного на корпусе лазерного гироскопа. Определен класс точности бесплатформенной навигационной системы, в которую будет установлен этот гироскоп.*

### Ключевые слова

*Навигационные системы, гироскоп, вариация Аллана, дисперсия, метод наименьших квадратов, кольцевой лазер, подвижные комплексы, летательные аппараты*

Поступила в редакцию 24.05.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

---

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на лазерных гироскопах знаменуют качественный скачок в обеспечении автономной навигации. Применение БИНС обеспечивает такой скачок благодаря повышению точности измеряемых параметров и надежности системы в целом при снижении массогабаритных характеристик и энергопотребления. Подобные системы находят все более широкое применение в современных и перспективных наземных подвижных комплексах и летательных аппаратах военного назначения [1].

В работах [2–4] рассмотрено влияние погрешностей и нестабильностей лазерных гироскопов на точностные характеристики БИНС 1–3-го классов, а также приведена методика отбора гироскопов для высокоточных БИНС на основе результатов испытаний. При этом оценка точности гироскопа [5] проводилась классическим методом, согласно которому полная погрешность выходного сигнала, присутствующая в каждом измерении выходной характеристики, представляет собой сумму случайной и систематической составляющих. Такой подход является оправданным при серийном выпуске продукции, когда целью лю-

бого производителя становится сокращение длительности технологических процессов без ущерба для качества выпускаемого изделия.

Однако для более подробного изучения случайного характера выходных характеристик гироскопов, особенно для применения в БИНС, требуется их более тщательная идентификация [6]. Такую идентификацию предлагается проводить с использованием метода вариации Аллана [7, 8]. Данный метод широко применяется для определения исходных случайных процессов, оказывающих влияние на выходные параметры измеряемых данных.

При использовании метода вариации Аллана при анализе данных предполагают, что случайный характер данных определяется источниками шумов специфического характера. Можно выделить пять основных составляющих шума измерений: случайное блуждание угла, случайное блуждание угловой скорости (шумовая составляющая дрейфа), нестабильность смещения нуля, шум квантования, и линейный уход (тренд) угловой скорости [9].

Рассмотрим  $N$  замеров (отсчетов) данных гироскопа за период измерения  $t_0$ . Сформируем кластеры данных длиной  $\tau_0, 2\tau_0, \dots, k\tau_0$  ( $k < N/2$ ) и получим средние суммы точек данных, содержащихся в каждом кластере по их длине. Вариация Аллана является функцией времени кластера.

Вариацию Аллана можно определить либо через выходную угловую скорость  $\Omega(t)$ , либо через выходной угол:

$$\Theta(t) = \int \Omega(t) dt. \tag{1}$$

Нижний предел интегрирования в выражении (1) не задан, так как в выражениях применяется только разность углов. Угловые измерения осуществляются в дискретные моменты времени  $t = k\tau_0, k = 1, 2, 3, \dots, N$ . Следовательно, данное выражение можно упростить:

$$\Theta_k = \Theta(k\tau_0).$$

Средняя угловая скорость между  $t_k$  и  $t_k + \tau$  составит

$$\bar{\Omega}_k(\tau) = \frac{\Theta_{k+m} - \Theta_k}{\tau},$$

где  $\tau = m\tau_0$ .

Вариация Аллана определяется как

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle (\bar{\Omega}_{k+m} - \bar{\Omega}_k)^2 \right\rangle = \frac{1}{2\tau^2} \left\langle (\Theta_{k+2m} - 2\Theta_{k+m} + \Theta_k)^2 \right\rangle,$$

где  $\langle \rangle$  — среднее по ансамблю.

Вариация Аллана оценивается следующим образом:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2m)} \sum_{k=1}^{N-2m} (\Theta_{k+2m} - 2\Theta_{k+m} + \Theta_k)^2.$$

В большинстве анализируемых случаев различные шумовые составляющие проявляются на разных участках  $\tau$ . Это позволяет легко идентифицировать различные случайные процессы, содержащиеся в данных [9]. Если предположить, что все имеющиеся случайные процессы статически независимы, то можно показать, что вариация Аллана для любого  $\tau$  — это сумма вариаций Аллана для отдельных случайных процессов для того же  $\tau$ :

$$\sigma^2(\tau) = \sum \sigma_i^2 = \frac{Q^2}{\tau^2} + \frac{N^2}{\tau} + \frac{2B}{\pi} \ln 2 + \frac{K^2 \tau}{3} + \frac{R^2 \tau^2}{2}, \quad (2)$$

где  $Q$  — коэффициент шума квантования;  $N$  — коэффициент случайного блуждания угла (шумовой составляющей дрейфа);  $B$  — коэффициент нестабильности смещения нуля;  $K$  — коэффициент случайного блуждания угловой скорости;  $R$  — коэффициент тренда угловой скорости. В связи с этим для оценки амплитуды отдельно взятого случайного шума на любом отрезке  $\tau$  требуется знать амплитуды других случайных шумов на данном отрезке.

Каждый из полученных коэффициентов  $R$ ,  $K$ ,  $B$ ,  $N$ ,  $Q$  полинома (2) представляет собой отдельные шумовые составляющие, присутствующие в выходном сигнале гироскопа. Эффективным методом для получения значений коэффициентов при условии того, что вариация Аллана — это полиномиальная функция пяти неизвестных коэффициентов, является метод наименьших квадратов.

Таким образом, для определения степени годности лазерных гироскопов для их применения в навигационных системах того или иного класса точности достаточно провести ряд испытаний, включающих оценку стабильности выходного сигнала по всем временам осреднения.

В качестве объекта исследования авторами был выбран серийно выпускаемый фирмой «ООО «Научно-производственный комплекс «Электрооптика» лазерный гироскоп ГЛ-2Д [7, 8]. Кольцевой лазер данного гироскопа выполнен в виде ситаллового моноблока периметром 28 см с призмами полного внутреннего отражения и механической знакопеременной частотной подставкой и высокочастотной накачкой.

Исследования стабильности выходного сигнала лазерного гироскопа ГЛ-2Д проводили при пяти значениях температуры:  $t = -50, -25, 0, +25, +50$  °С при запуске длительностью 2 ч. Измеряли нормальную составляющую угловой скорости Земли, равная на широте г. Москва 12,43 град/ч. Отсчеты данных выводили в виде импульсов, где

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^T \Delta \Omega dt$$

— число периодов выходного сигнала лазерного гироскопа, полученное за время усреднения  $T$ .

Данные снимали с частотой 400 Гц (период квантования сигнала  $\tau_k = 2,5$  мс). Для каждого из 100-секундных интервалов, на которых усреднена реализация при суммировании, можно записать

$$N_{100} = \sum_{k=t}^{t+100} N_k .$$

При этом средняя угловая скорость при 100 секундном усреднении примет вид

$$\bar{\Omega} = \frac{S_0 N_{100}}{100} ,$$

где  $S_0$  — масштабный коэффициент лазерного гироскопа, угл. с/имп. Для гироскопа ГЛ-2Д масштабный коэффициент составляет 0,92 угл. с/имп.

Параметры нестабильности лазерного гироскопа методом вариации Аллана оценивали с использованием оригинальной программы RWCalc. На рис. 1 изображены зависимости дисперсии вариации Аллана от ряда времен осреднения, построенные для разных температур с использованием данной программы.

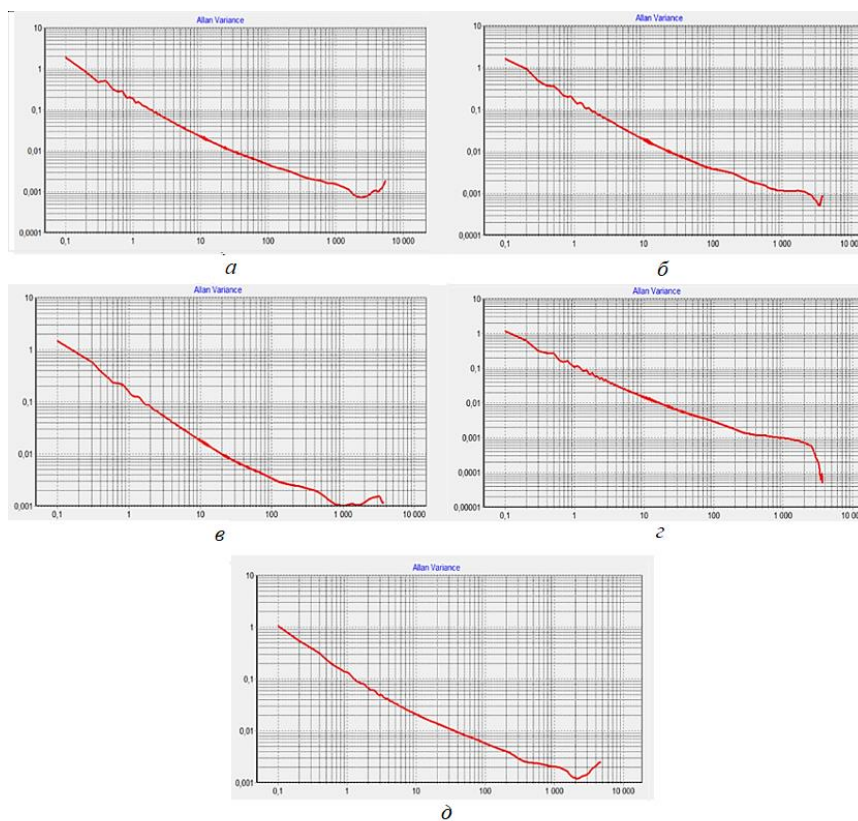


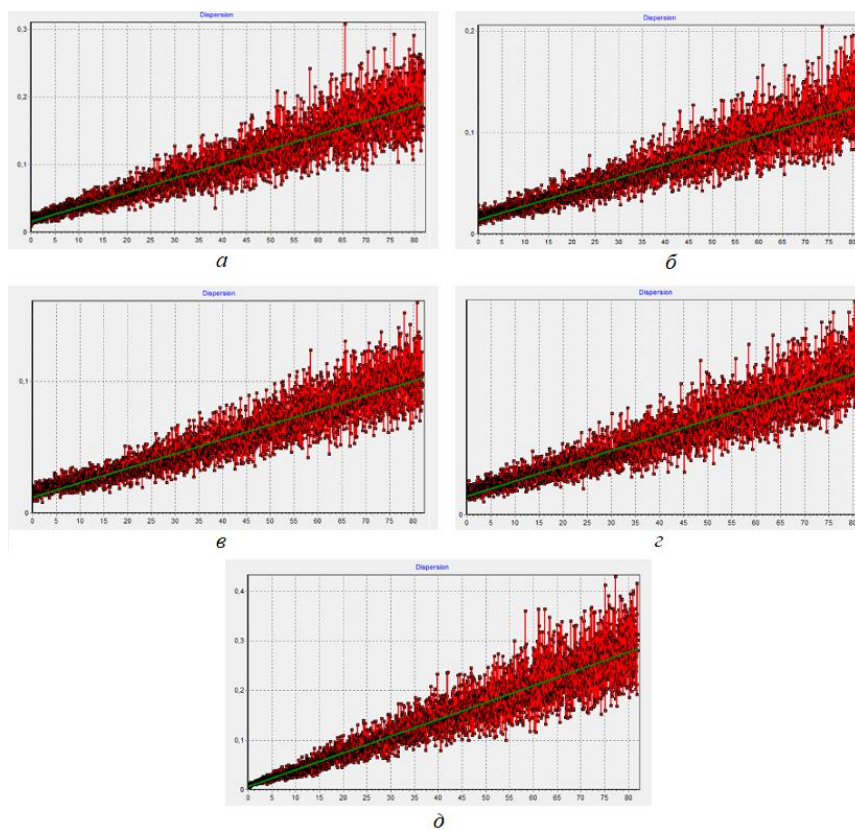
Рис. 1. Вариации Аллана для разных значений температуры:

$a$  —  $-50$  °C;  $б$  —  $-25$  °C;  $в$  —  $0$  °C;  $г$  —  $25$  °C;  $д$  —  $50$  °C

Алгоритм расчета случайного блуждания угла (шумовой составляющей дрейфа) лазерного гироскопа отличается от вычисления коэффициентов вариации Аллана методом наименьших квадратов и заключается в прямом измерении значения угла поворота, вызванного вращением Земли, за ряд промежутков времени.

После измерения углов вычисляется дисперсия  $\sigma^2$  угла поворота, измеренного гироскопом, от времени измерения и методом линейной регрессии определяется коэффициент  $N$ . Шумовые составляющие дрейфа для разных температур приведены на рис. 2.

Простым осреднением 100-секундных точек программа RWCalc позволяет вычислить коэффициент нестабильности нулевого параметра  $B$ . Коэффициенты  $N$  и  $B$ , полученные разными методами для разных температур, сведены в табл. 1.



**Рис. 2.** Шумовые составляющей дрейфа для разных значений температуры:

$a$  —  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $б$  —  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $в$  —  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $г$  —  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $д$  —  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сравнение коэффициентов нестабильностей гироскопа, полученных разными методами, показывает их незначительное расхождение в пределах 5...10%. Согласно ГОСТ РВ 52 339–2005 [10], БИНС подразделяют на три класса точности (табл. 2).

Таблица 1

**Коэффициенты нестабильностей гироскопа ГЛ-2Д, полученные разными методами**

Коэффициенты, методы	T, °C				
	-50	-25	0	25	50
N, методом вариации Аллана, град/ч <sup>0,5</sup>	0,00081	0,00067	0,00055	0,00045	0,00098
N, прямым измерением, град/ч <sup>0,5</sup>	0,00077	0,00063	0,00055	0,00037	0,00097
B, методом Аллана, град/ч	0,0083	0,0073	0,0068	0,0078	0,0094
B, 100-секундным осреднением, град/ч	0,0099	0,0071	0,0061	0,0090	0,0110

Таблица 2

**Точностные характеристики БИНС 1–3-го классов**

Класс точности БИНС	Погрешность определения координат, км/ч	Нестабильность смещения нуля, град/ч	Шумовая составляющая дрейфа, град/ч <sup>0,5</sup>
1	0,90	0,005	0,0010
2	1,85	0,008	0,0015
3	3,70	0,015	0,0030

По результатам исследования параметры нестабильности смещения нуля гироскопа ГЛ-2Д попали в диапазон, соответствующий системе 2-го класса (см. табл. 1). Исключение составили оценки на крайних точках температурного диапазона. Формально по этому параметру прибор соответствует требованиям систем 3-го класса. Однако на практике приборы такого уровня, различающиеся по параметру нестабильности смещения нуля не более чем на 50 % требуемой величины, применяются в качестве курсовых гироскопов БИНС. Поэтому можно считать, что испытываемый гироскоп попадает в диапазон для БИНС 2-го класса. По параметру случайного блуждания угла (шумовой составляющей дрейфа) прибор соответствует критерию системы 1-го класса во всех точках температурного диапазона.

Таким образом, можно сделать вывод, что при проведении исследований точностных характеристик лазерных гироскопов БИНС наряду с классическими методами статистической обработки целесообразно использовать метод вариации Аллана как эффективное средство идентификации структуры шумов в канале измерения.

**Литература**

- [1] Болотнов А.С., Чепурнов И.А., Потапов В.А. Технологические аспекты развития навигационных систем подвижных наземных комплексов военного назначения. *Вестник Ярославского высшего военного училища ПВО*, 2020, № 1, с. 22–232.
- [2] Болотнов А.С. Применение лазерного гироскопа в платформенных инерциальных системах. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533>

- [3] Болотнов А.С. Исследование малогабаритного лазерного гироскопа для применения в подводных робототехнических комплексах. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 7. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-7-630>
- [4] Болотнов А.С., Вереникина Н.М., Назаров С.И. Исследование прецизионного лазерного гироскопа для задач инерциальной навигации. *Контенант*, 2020, т. 19, № 4, с. 91–102.
- [5] Шарова М.А., Дядин С.С. Анализ погрешностей динамически настраиваемого гироскопа для гироинерциального блока методом вариации Аллана. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*, 2019, № 3, с. 69–77.
- [6] Авиев А.А., Енин В.Н., Санеев И.В. Экспериментальные исследования методом вариаций Аллана триады лазерных гироскопов с виброподставкой. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 6. URL: <http://engineering-science.ru/en/doc/842332.html>
- [7] Степанов О.А., Челпанов И.Б., Моторин А.В. О точности оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связи с вариацией Аллана. *Мат. XXII СПб. межд. конф. по интегрированным навигационным системам*. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2015, с. 485–491.
- [8] Кутовой Д.А., Ситников П.В. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока. *Навигация и управление движением. Мат. XV конф. молодых ученых*. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2013, с. 246–252.
- [9] IEEE Std 647-2006. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros. IEEE, 2006.
- [10] ГОСТ РВ 52339-2005. Системы бесплатформенные инерциально-навигационные на лазерных гироскопах. М., Стандартинформ, 2005.

**Болотнов Альберт Сергеевич** — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Фомин Иван Игоревич** — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Вереникина Нина Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Болотнов А.С., Фомин И.И. Исследование лазерного гироскопа с использованием метода вариации Аллана. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 05(58). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-05-702>

## STUDY OF A LASER GYROSCOPE USING THE ALLAN VARIATION METHOD

A.S. Bolotnov

electsab@gmail.com

SPIN-code: 2102-2943

I.I. Fomin

vanyafomin@yandex.ru

SPIN-code: 4427-0800

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

The paper describes the advantages of using the Allan variation method in studying the noise components of the laser gyroscopes output signals in strapdown inertial navigation systems. The graphs are presented for the accuracy characteristics of the GL-2D ring laser gyroscope using the RWCalk program. The results are presented of calculating the noise components values of the ring laser gyroscope output signal using the Allan variation algorithm. The sources of noise components arising during measurements of the angular velocity using a photodetector mounted on the body of the laser gyroscope are determined. The accuracy class of the strapdown navigation system, into which this gyroscope will be installed, has been determined.

**Keywords**

Navigation systems, gyroscope, Allan variation, dispersion, least squares method, ring laser, mobile complexes, aircraft

Received 24.05.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

**References**

- [1] Bolotnov A.S., Chepurnov I.A., Potapov V.A. Technological aspects of navigation systems of military ground mobile complexes development. *Vestnik Yaroslavskogo vysshego voennogo uchilishcha PVO*, 2020, no. 1, pp. 22–232 (in Russ.).
- [2] Bolotnov A.S. The use of a laser gyroscope in strapdown inertial systems. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2019, no. 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533> (in Russ.).
- [3] Bolotnov A.S. Study of a small-sized laser gyroscope for use in underwater robotic systems. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2020, no. 7. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-7-630> (in Russ.).
- [4] Bolotnov A.S., Verenikina N.M., Nazarov S.I. Investigation of a precision laser gyro for inertial navigation problems. *Kontenant*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 91–102 (in Russ.).
- [5] Sharova M.A., Dyadin S.S. Allan variance in dynamically tuned inertial-unit gyro error analysis. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz-Antey"* [Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation], 2019, no. 3, pp. 69–77 (in Russ.).
- [6] Aviev A.A., Enin V.N., Saneev I.V. Experimental research of the dithering ring laser gyro triad by Allan variations method. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 6. URL: <http://engineering-science.ru/en/doc/842332.html> (in Russ.).
- [7] Stepanov O.A., Chelpanov I.B., Motorin A.V. [On accuracy of sensor bias estimation and its relationship with Allan variance]. *Mat. XXII SPb. mezhd. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [Proc. XXII Sankt-Petersburg Int. Conf. on Integrated Posi-



- tioning Systems]. Sankt-Petersburg, TsNII “Elektropribor” Publ., 2015, pp. 485–491 (in Russ.).
- [8] Kutovoy D.A., Sitnikov P.V. [Same practical issues of using Allan variation at study on strapdown inertial unit]. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem. Mat. XV konf. molodykh uchennykh* [Navigation and Motion Control. Proc. XV Conf. of Young Scientists]. Sankt-Petersburg, TsNII “Elektropribor” Publ., 2013, pp. 246–252 (in Russ.).
- [9] IEEE Std 647-2006. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros. IEEE, 2006.
- [10] GOST RV 52339-2005. Sistemy besplatformennyye inertsiyal'no-navigatsionnyye na lazernyykh giroskopakh [State standard GOST RV 52339-2005. Strapdown inertial navigation systems on laser gyroscope]. Moscow, Standartinform, Publ. 2005 (in Russ.).

**Bolotnov A.S.** — Student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Fomin I.I.** — Student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Verenikina N.M., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Bolotnov A.S., Fomin I.I. Study of a laser gyroscope using the Allan variation method. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 05(58). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-05-702.html> (in Russ.).