

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 629.7.05:681.2.08

DOI: 10.14529/ctcr150407

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов

АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург

Разработана методика оценки шумовых составляющих в измерительной информации инерциальных датчиков по методу вариации Аллана, при этом расчет вариации Аллана проводился, исходя из заданного уровня достоверности. Методика основана на способе многопараметрической оптимизации предложенной авторами нелинейной целевой функции и апробирована на примере акселерометрической и углоизмерительной информации образца бесплатформенного инерциального блока. Проведен сравнительный анализ полученных оценок шумовых составляющих с соответствующими оценками по классически используемому методу наименьших квадратов, а также с заявленными разработчиком характеристиками.

*Ключевые слова:* вариация Аллана, инерциальные датчики, многопараметрическая оптимизация, структура шумов.

### Введение

В развитие ряда исследований, проводимых АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова» (НПОА) (г. Екатеринбург) по тематике вариации Аллана, разработана методика оценки шумов в измерительных каналах, базирующаяся на рекомендациях [1, 2]. При этом определение коэффициентов аппроксимирующего полинома для вариации Аллана осуществляется с помощью многопараметрической оптимизации предложенной авторами нелинейной целевой функции.

Практическое применение данной методики продемонстрировано на примере обработки акселерометрической и углоизмерительной информации образца бесплатформенного инерциального блока (БИБ) с оценкой ряда шумовых составляющих. Проведено сравнение полученных оценок с аналогичными оценками, сделанными по методу наименьших квадратов, указанному в руководстве [4], а также с заявленными разработчиком характеристиками.

### 1. Описание методики оценки шумов измерительных каналов с использованием метода вариации Аллана

Формула для расчета вариации Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  при условии равномерного шага опроса инерциального измерителя имеет вид:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(L-2l+1)} \sum_{n=0}^{L-2l} \left( \sum_{i=1}^l (\Delta N(t_{n+i}) - \Delta N(t_{n+l+i})) \right)^2,$$

где  $\tau = l \cdot \Delta t$  – интервал осреднения данных измерителя, с;  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  – длительность такта опроса измерителя, с;  $l$  – количество опросов на интервале осреднения ( $l = 1, 2, \dots \leq L/2$ );  $L$  – общее количество опросов измерителя в запуске;  $\Delta N(t_i)$  – приращение кода за такт опроса на выходе измерителя, код.

Согласно [5] достоверность расчета вариации Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  на интервале осреднения  $\tau$  зависит от  $l$  и  $L$ , при этом среднее квадратическое отклонение от ошибки расчета вариации Аллана определяется следующим образом:

$$\sigma_e = 1 / \sqrt{2 \left( \frac{L}{l} - 1 \right)}. \quad (1)$$

Исходя из основных известных шумовых составляющих в измерительных каналах, вариацию Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  можно представить посредством аппроксимирующего полинома  $p_A^2(\tau)$  следующего вида [4, 5]:

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

В табл. 1 представлены пояснения относительно коэффициентов  $R$ ,  $K$ ,  $B$ ,  $N$  и  $Q$  аппроксимирующего полинома (2), характеризующих согласно [4] интенсивность отдельных шумовых составляющих и соответствующих определенным наклонам  $\sigma_A^2(\tau)$ -графика вариации Аллана, построенного в логарифмическом масштабе по обеим осям.

Таблица 1

Характеристики  $\sigma_A^2(\tau)$ -графика

Наклон $\sigma_A^2(\tau)$ -графика	Коэффициент полинома $p_A^2(\tau)$	Тип погрешности в терминах спектральной плотности шума $P(f)$ / вариации Аллана $\sigma_A^2(\tau)$
-2	$Q$	Шум квантования
-1	$N$	Белый шум приращения выходного сигнала / случайное блуждание выходного сигнала
0	$B$	Фликкер-шум выходного сигнала / нестабильность смещения нуля
+1	$K$	Красный (коричневый) шум приращения выходного сигнала / случайное блуждание изменения выходного сигнала
+2	$R$	Тренд приращения выходного сигнала

В отличие от рекомендованного руководством [6] использования метода наименьших квадратов (МНК) аппроксимация кривой вариации Аллана для получения численных значений полинома  $p_A^2(\tau)$  производилась способом многопараметрической оптимизации (МПО) [2], заключающейся в минимизации по набору коэффициентов  $R^2$ ,  $K^2$ ,  $B^2$ ,  $N^2$  и  $Q^2$  целевой функции вида

$$\sum_{k=0}^K Abs \left( \ln \left( \sigma_A^2(\tau) \right) - \ln \left( p_A^2(\tau) \right) \right) \xrightarrow{\{R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2\}} \min.$$

При этом методическая погрешность указанного способа, определенная по результатам моделирования [2], для шума квантования и белого шума не превышает 1 %, для фликкер-шума, красного шума и линейного тренда не превышает 5 %.

## 2. Апробация методики оценки шумов измерительных каналов

Практическая апробация методики оценки шумов измерительных каналов проведена на примере обработки акселерометрической и углоизмерительной информации образца БИБ разработки филиала ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» «НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова» (г. Москва). Блок чувствительных элементов указанного образца БИБ реализован на базе четырех маятниковых акселерометров МА $i$  и четырех волоконно-оптических гироскопов ВОГ $i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ).

Информация для обработки получена с выхода образца БИБ, находящегося в стационарном положении, в процессе двух запусков длительностью три часа каждый и шагом съема информации 0,004 с. Расчет вариации Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  осуществлялся на интервале осреднения  $\tau$  длительностью  $\lg 2/20$ , рекомендованной [2]. Нахождение коэффициентов аппроксимирующего поли-

нома  $p_A^2(\tau)$  проводилось посредством МПО с последующим сравнением с методом наименьших квадратов (МНК), рекомендуемым [4, 5].

Вся обработка осуществлялась с помощью специализированного программного обеспечения собственной разработки НПОА в средах программирования Delphi и Visual Basic, описанной в [1].

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены  $\sigma_A^2(\tau)$ -график и график аппроксимирующей кривой  $p_A^2(\tau)$ , построенные в логарифмическом масштабе по обеим осям по кодовой информации МА1 и ВОГ3 соответственно. Кроме этого на рис. 1 показаны касательные к  $\sigma_A^2(\tau)$ -графику с характерными наклонами «0» (нестабильность нулевого сигнала) и «-2» (шум квантования), на рис. 2 – касательные с наклонами «0» (нестабильность нулевого сигнала) и «-1» (случайное блуждание угла).

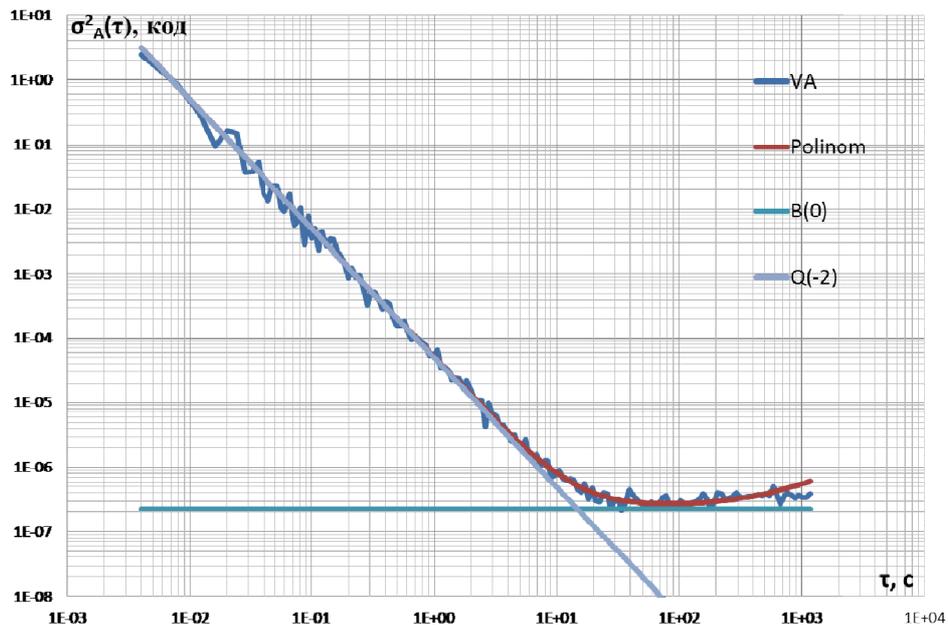


Рис. 1. Вид  $\sigma_A^2(\tau)$ -графика от времени осреднения  $\tau$  по информации МА1 образца БИБ

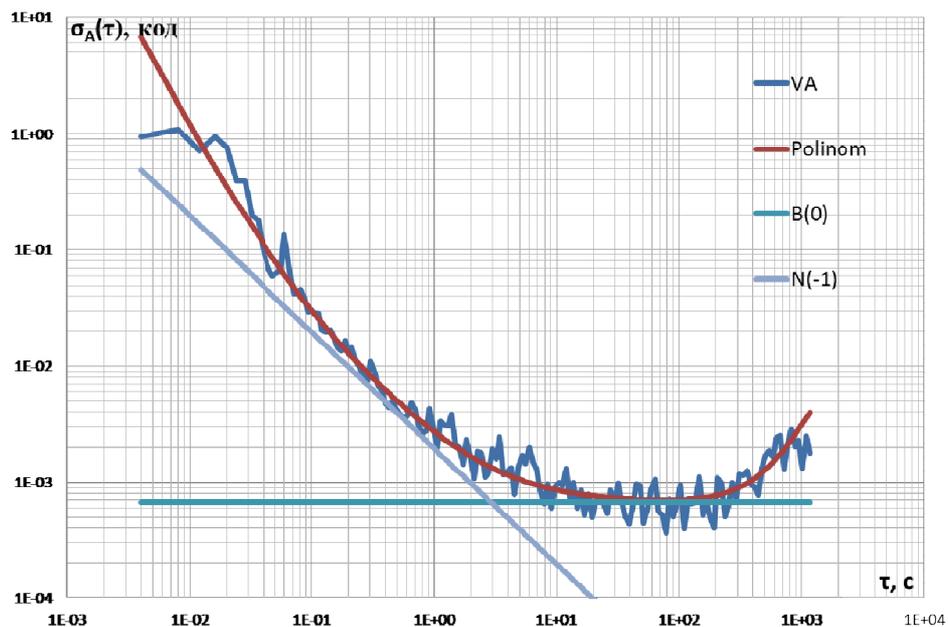


Рис. 2. Вид  $\sigma_A^2(\tau)$ -графика от времени осреднения  $\tau$  по информации ВОГ3 образца БИБ

## Приборостроение, метрология

Численные значения оценок шумовых характеристик  $MA_i$  и  $BOГ_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) рассматриваемого образца БИБ, осредненные по результатам обработки двух 3-часовых запусков, приведены в табл. 2 и 3 соответственно. При этом точность расчета вариации Аллана, определенная согласно формуле (1), составляла не менее 10 % (или  $\sigma_e \leq 0,1$ ). Указанные в таблицах оценки переведены в физическую размерность с учетом соответствующих масштабных коэффициентов  $MA_i$  и  $BOГ_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ). Наряду с оценками, полученными с помощью МПО, в таблицах представлены оценки, сделанные с использованием МНК (на примере информации  $MA_4$  и  $BOГ_4$ ), а также данные, заявленные разработчиком БИБ.

Таблица 2

Оценки шумовые характеристики МА образца БИБ по методу вариации Аллана

Способ аппроксимации	МПО				МНК	Допуск по паспорту разработчика, не более
	Измерительный канал					
Наименование точностной характеристики	МА1	МА2	МА3	МА4	МА4	
Нестабильность нулевого сигнала МА $\times 10^{-6}$ , м/с <sup>2</sup>	0,16	0,15	0,15	0,14	0,22	400,00
Шум квантования выходного сигнала МА $\times 10^{-6}$ , м/с	0,81	1,74	0,54	2,40	2,42	0,24

Таблица 3

Оценки шумовых характеристик ВОГ образца БИБ по методу вариации Аллана

Способ аппроксимации	МПО				МНК	Допуск по паспорту разработчика, не более
	Измерительный канал					
Наименование точностной характеристики	ВОГ1	ВОГ2	ВОГ3	ВОГ4	ВОГ4	
Нестабильность нулевого сигнала ВОГ $\times 10^{-3}$ , угл. град/ч	0,71	0,72	0,65	0,91	1,44	30,00
Случайное блуждание угла ВОГ $\times 10^{-3}$ , угл. град/ $\sqrt{ч}$	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	5,00

Анализ табл. 2 и 3 показал следующее:

- численные значения оценок по способу МПУ ниже соответствующих оценок по способу МПО, при этом схожая картина наблюдалась и на этапе моделирования шумовых составляющих [2];
- оценки в части неустойчивости нулевых сигналов  $MA_i$  и  $BOГ_i$  и случайного блуждания угла  $BOГ_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) лежат в пределах, заявленных разработчиком БИБ;
- превышение уровня шума квантования  $MA_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) относительно заявленного разработчиком БИБ, наблюдаемое для обоих способов аппроксимации, может свидетельствовать о том, что квантование сигнала происходит с меньшей частотой, чем указано в паспорте образца БИБ. С учетом того, что зафиксированное превышение подтверждается также результатами «классической» тарировки, данное обстоятельство требует проведения дополнительного анализа с привлечением разработчика БИБ.

### Заключение

Приведено описание методики оценки шумовых составляющих инерциальных измерителей с использованием метода вариации Аллана. В основу методики заложен альтернативный метод наименьших квадратов способ аппроксимации кривой вариации Аллана посредством многопараметрической оптимизации предложенной авторами нелинейной целевой функции.

Изложены результаты практических расчетов по данной методике для акселерометрической и углоизмерительной информации опытного образца бесплатформенного инерциального блока. Проведено сравнение полученных оценок с оценками по методу наименьших квадратов, а также с заявленными характеристиками разработчика БИБ.

#### Литература

1. Оценка основных характеристик бесплатформенного инерциального блока с использованием вариации Аллана / Д.А. Кутовой, П.В. Ситников, А.А. Федотов, В.Л. Якимов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2014. – № 1 (43). – С. 201–209.

2. К вопросу оценки шумовых составляющих измерительного тракта по методу вариации Аллана / Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 2 (89). – С. 30–39.

3. Сирая, Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения / Т.Н. Сирая // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 2 (69). – С. 29–36.

4. IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.

5. IEEE Std 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. IEEE Std 952-1997 (R2008). IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

**Кутовой Денис Алексеевич**, инженер-конструктор 1 категории, АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург; kutovoidenis@mail.ru.

**Перепелкина Светлана Юрьевна**, главный специалист тематического подразделения, АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург; avt@npoa.ru.

**Федотов Андрей Анатольевич**, канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер-конструктор, АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург; avt@npoa.ru.

Поступила в редакцию 23 сентября 2015 г.

DOI: 10.14529/ctcr150407

## USE OF ALLAN VARIANCE FOR PRACTICAL DETERMINATION OF NOISE STRUCTURE OF INERTIAL MEASUREMENT UNITS

**D.A. Kutovoy**, kutovoidenis@mail.ru,

**S.Yu. Perepelkina**, avt@npoa.ru,

**A.A. Fedotov**, avt@npoa.ru

“Scientific & Production Association of Automatics named after the academician N.A. Semikhatov”  
JCS, Ekaterinburg, Russian Federation

The assessment procedure of noise components in the measurement data of inertial sensors according to the Allan variance method has been developed. Herewith the calculation of the Allan variance was made on the basis of the given confidence level. The procedure is based on multiparametric optimization technique suggested by the authors of nonlinear objective function and proved in terms of accelerometric and angle-measuring information of the strapdown inertial unit sample. The comparative analysis between obtained values of the noise components and corresponding estimates derived from the conventionally used least-squares method, as well as characteristics claimed by designer, was carried out.

*Keywords: Allan variance, inertial sensors, white noise, noise structure.*

### References

1. Kutovoy D.A., Sitnikov P.V., Fedotov A.A., Yakimov V.L. [Allan Variance-Based Assessment of Basic Characteristics of a Strapdown Inertial Unit]. *Bulletin of Samara State Aerospace University named after the Academician S.P. Korolev (National Research University)*, 2014, no. 1 (43), pp. 201–209. (in Russ.)
2. Kutovoy D.A., Maslova O.I., Perepelkina S.Yu., Fedotov A.A. [Estimation of Noise Characteristics in Output Measurements by Allan Variance Method]. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 3 (90), pp. 30–39. (in Russ.)
3. Siraya T.N. [Allan Variance as an Estimate of Measurement Errors]. *Gyroscopy and Navigation*, 2010, no. 2 (69), pp. 29–36. (in Russ.)
4. IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
5. IEEE Std 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. IEEE Std 952-1997 (R2008). IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

*Received 23 September 2015*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кутовой, Д.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов инерциальных измерителей / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 67–72. DOI: 10.14529/ctcr150407

### FOR CITATION

Kutovoy D.A., Perepelkina S.Yu., Fedotov A.A. Use of Allan Variance for Practical Determination of Noise Structure of Inertial Measurement Units. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 67–72. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150407

---