

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.382.049.77

doi:10.21685/2307-4205-2021-2-5

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДРЕЙФОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ ГЕ 006 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

О. Н. Лузгина¹, С. А. Москалев², Н. В. Недопекин³,
А. С. Новоселов⁴, А. А. Папко⁵, А. В. Поспелов⁶

^{1,2,3,4,5,6} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия
^{1,3,6} inercial@niifi.ru, ² moskalev_sa@niifi.ru, ^{4,5} info@niifi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Опыт исследования и разработки волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) в РФ в сравнении с аналогичным зарубежным опытом не отличается многообразием приемов, среди которых основное место занимает решение проблем механической балансировки резонаторов, зарекомендовавшей себя непроизводительной и непредсказуемой процедурой. Наряду с этим известным фактом является то, что современный ВТГ управляется четырьмя системами автоматического управления энергией колебаний, компенсации угловой скорости, квадратуры и фазы. Обобщенным критерием оценки требуемого качества работы указанных систем является достижение установленных значений дрейфовых характеристик ВТГ. Как правило, в технических заданиях на их разработку устанавливаются требуемые значения случайного блуждания нуля σ_{ARW} [$^{\circ}/\sqrt{ч}$] и стабильности нуля b [$^{\circ}/ч$] без привязки к методам оценки, несмотря на то, что σ_{ARW} и b входят только в номенклатуру параметров, оцениваемых по вариациям Аллана. *Материалы и методы.* Метод вариаций Аллана [1] признается его разработчиком альтернативой известным методам классического дисперсионного анализа, имеющим определенные ограничения при оценке дрейфов. Наряду с этим при выходе ВТГ ГЕ 006 на рынок пришлось столкнуться со скептическим отношением потребителя к методу Аллана без уточнения каких-либо веских причин подобного недоверия. *Результаты и выводы.* Приводится обоснование выбора метода оценки дрейфовых характеристик ВТГ ГЕ 006 на примерах всестороннего анализа выборок, полученных в длинных и коротких запусках с использованием двух моделей дрейфа – вариаций Аллана и классического дисперсионного анализа.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, метод вариаций Аллана, нестационарный процесс, шумы, спектры, случайное блуждание нуля, смещения нуля

Для цитирования: Лузгина О. Н., Москалев С. А., Недопекин Н. В., Новоселов А. С., Папко А. А., Поспелов А. В. О возможностях выбора метода оценки дрейфовых характеристик волновых твердотельных гироскопов ГЕ 006 на основе экспериментального подтверждения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 53–61. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-5

ON THE POSSIBILITIES OF CHOOSING A METHOD FOR ESTIMATING THE DRIFT CHARACTERISTICS OF GE 006 WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES BASED ON EXPERIMENTAL CONFIRMATION

**O.N. Luzgina¹, S.A. Moskalev², N.V. Nedopekin³,
A.S. Novoselov⁴, A.A. Papko⁵, A.V. Pospelov⁶**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia
^{1, 3, 6} intercial@niifi.ru, ² moskalev_sa@niifi.ru, ^{4, 5} info@niifi.ru

Abstract. Background. The experience of research and development of wave solid-state gyroscopes (WGG) in the Russian Federation in comparison with similar foreign experience does not differ in a variety of techniques, among which the main place is occupied by the solution of the problems of mechanical balancing of resonators, which has proven to be an unproductive and unpredictable procedure. Along with this, it is a well-known fact that the modern HHG is controlled by four systems of automatic control of vibration energy, compensation of angular velocity, quadrature and phase. A generalized criterion for assessing the required quality of operation of these systems is the achievement of the established values of the drift characteristics of the HTG. As a rule, the terms of reference for their development set the required values of the random walk of zero σ_{ARW} [$^{\circ} / \sqrt{h}$] and zero stability b [$^{\circ} / h$] without reference to estimation methods, despite the fact that σ_{ARW} and b are included only in the nomenclature parameters estimated by Allan variations. **Materials and methods.** Allan's method of variations [1] is recognized by its developer as an alternative to the well-known methods of classical analysis of variance, which have certain limitations in assessing drifts. Along with this, when VTG GE 006 entered the market, it was necessary to face the skeptical attitude of the consumer towards the Allan method without specifying any compelling reasons for such distrust. **Results and conclusions.** It's given the purpose of this article is to justify the choice of the method for assessing the drift characteristics of the HTG GE 006 on examples of a comprehensive analysis of samples obtained in long and short runs using two drift models - Allan variations and classical analysis of variance.

Keywords: wave solid-state gyroscope, Allan variation method, non-stationary process, noise, spectra, random walk of zero, zero offsets

For citation: Luzgina O.N., Moskalev S.A., Nedopekin N.V., Novoselov A.S., Papko A.A., Pospelov A.V. On the possibilities of choosing a method for estimating the drift characteristics of GE 006 wave solid-state gyroscopes based on experimental confirmation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;2:53–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-5

Введение

Волновыми твердотельными гироскопами называются устройства для измерения углов поворота и угловой скорости, реализованные на взаимодействии эффектов Брайана и Кориолиса, в результате которого в кромке осесимметричного резонатора формируется стоячая волна деформаций, пространственное положение которой относительно заданной системы координат пропорционально измеряемым параметрам.

Рабочие волновые процессы в резонаторе ВТГ, представляющем собой цилиндрическую или полусферическую оболочку из металла, кварца, пьезокерамики и т.д., формируются суперпозицией двух независимых модальных колебаний – первичной моды (возбуждения) и вторичной моды (измерения) вдоль осей жесткости резонатора. Для реализации процесса измерения угла и угловой скорости в резонаторе ВТГ генерируется стоячая волна на частоте, близкой или равной одной из множества мод, чаще всего второй с не менее чем двумя каналами управления и двумя измерительными каналами так, что пучность стоячей волны расположена рядом с электродом одного из каналов управления, а вращение резонатора вокруг оси симметрии формирует силу Кориолиса, под действием которой пространственное положение стоячей волны изменяется относительно электродов возбуждения пропорционально угловой скорости вращения Ω .

Наличие разночастотности и разнодобротности колебаний резонатора по ортогональным осям приводит к ухудшению дрейфовых характеристик и в этой связи делает актуальными не только решение проблем их улучшения, но и повышение достоверности их оценок.

Классификация и методы оценки ошибок гироскопов

Традиционно ошибки инерциальных компонентов – акселерометров и гироскопов делятся на детерминированные и случайные. Для обеспечения требуемой точности гироскопа и последующих навигационных решений значимым является понимание стохастической природы этих ошибок.

Способы определения и компенсации детерминированных ошибок гироскопов хорошо исследованы и широко применяются в процессах изготовления.

Случайные шумы гироскопа представляют собой смесь разных шумов. Для понимания способов уменьшения их влияния рассмотрим особенности их проявления и модели описания, позволяющие сформулировать их идентификационные признаки.

В зависимости от методов обработки выходных сигналов гироскопа процесс идентификации шумов имеет различные результаты.

Наиболее распространенными методами оценки шумовых характеристик гироскопов являются:

– классический дисперсионный анализ, который распространяется на получение оценок шумов стационарных случайных процессов. При этом основными оценочными параметрами являются математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО), определенные по выборке, содержащей N -результатов измерений. При эксплуатации инерциальных компонентов, оценкам дрейфовых характеристик, полученных методом статистического анализа, отдается предпочтение. Ниже будет показано, что полученные при этом результаты являются недостоверными [2].

Для оценки шумовых компонент нестационарных случайных процессов используются два метода: метод оценки спектральной плотности мощности (PSD , *Power Spectral Density*) и метод вариаций Аллана (VA).

Значимость использования этой пары методов подтверждается целями известной программы *AlaVar 5.2*, предусматривающей сочетание оценок PSD и метода Аллана.

Спектральная плотность мощности PSD описывает распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, или мощность, приходящуюся на интервал частот, границы которого различаются на 1 Гц [Дж/Гц].

Связь между VA и PSD определяется выражением

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4 \pi f \tau}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (1)$$

где $S_{\Omega}(f)$ – PSD случайного процесса $\Omega(\tau)$.

Согласно этому уравнению дисперсия Аллана пропорциональна общей выходной мощности случайных процессов при пропускании через фильтр с передаточной функцией вида $\sin^4(x)/(x)^2$. Уравнение (1) является центральным элементом метода вариаций Аллана и используется для вычисления его дисперсии из PSD . При этом модель PSD любого физического процесса, подставленного в формулу (1), позволяет получить для него выражение для дисперсии Аллана $\sigma^2(\tau)$ как функции длины периода усреднения, так как значение $\sigma^2(\tau)$ является фактически измеряемой величиной, полученная кривая Аллана позволяет идентифицировать случайные процессы, существующие в виде смеси в выходных информационных потоках каждого датчика.

При этом из-за отсутствия взаимно однозначных соотношений между $\sigma^2(\tau)$ и PSD вычислить спектральную плотность из анализа $\sigma^2(\tau)$ не представляется возможным так же, как и оценить по PSD количественные характеристики шумовых процессов.

Так как полоса пропускания фильтра $\sin^4(x)/(x)^2$ зависит от времени, путем его измерения можно исследовать различные типы случайных процессов. Именно по этой причине дисперсия Аллана представляет собой эффективное средство идентификации и количественной оценки шумовых составляющих, присутствующих в информационных потоках гироскопов в виде смеси.

Для сравнения реальных возможностей интерпретации результатов записи информационных массивов ВТГ ГЕ 006 ниже представлены:

– оценки эффективности использования вариаций Аллана для идентификации шумов с целью определения гипотетических причин их возникновения и разработки алгоритмов фильтрации отдельных составляющих;

– оценка возможностей использования результатов дисперсионного анализа в качестве квалификационного критерия качества образцов гироскопов.

Для обеспечения качественных и количественных оценок шумов рассмотрим более подробно особенности использования программы *AlaVar 5.2* применительно к полученным экспериментальным данным.

В первую очередь необходимо отметить, что указанные процессы содержат высокочастотные и низкочастотные составляющие.

Высокочастотные составляющие описываются характеристиками белого шума, а низкочастотные представляют собой коррелированные шумы.

Для фильтрации высокочастотного шума в БИНС или на выходе датчика используются фильтры нижних частот или вейвлет-шумоподавление.

Коррелированные шумы можно смоделировать с достаточно высокой точностью с использованием метода Аллана в виде представления среднеквадратичной случайной ошибки дрейфа как функции времени осреднения. Отличительной особенностью метода являются возможности идентификации шести видов шумов:

1) шума квантования, характеризующего степень отличия цифровых данных от первичных аналоговых. Физической причиной возникновения подобного шума могут являться округление результата или отбрасывание младших разрядов;

2) основной шумовой компонент гироскопов – **случайное блуждание нуля** (σ_{ARW}), представляет собой аддитивный белый шум, проявляющийся в случайном отклонении от ожидаемых значений. Параметр σ_{ARW} влияет на результат интегрирования, который равен нулю при стационарном процессе. Под воздействием белого шума результаты измерений колеблются случайным образом, а среднее отклонение изменяется с увеличением времени. Для гироскопов σ_{ARW} имеет единицу измерения $^{\circ}/\sqrt{ч}$ и характеризует дрейф, ограниченный уровнем белого шума. На кривой Аллана σ_{ARW} определяется в точке ее пересечения с интервалом времени 1 с.

Процесс накопления среднеквадратического отклонения угла характеризуется отклонением

$$\sigma_0(t) = \sigma_{ARW} \sqrt{T_0 t}, \quad (2)$$

где T_0 – период дискретизации; t – интервал интегрирования;

3) **нестабильность нуля b** вызывается релаксационными шумами в конструкциях и электронных компонентах, которую связывают с фликкер-шумом, спектральная мощность которого обратно пропорциональна частоте. При этом предполагается также, что фликкер-шум представляет собой суперпозицию нескольких таких процессов [3], распространяясь на несколько частичных декад. Фликкер-шум оказывает значительное влияние на низких частотах, с увеличением частоты их интенсивность падает. При этом график мощности шума в логарифмическом масштабе медленно убывает, а на высоких частотах перекрывается белым шумом. Фликкер-шум относится к нестационарным случайным процессам. Общей теории для описания фликкер-шума до настоящего времени не существует, что привело к обоснованию подхода, основанного на дробном интегрировании спектра белого шума с передаточной функцией (ПФ) $1/\sqrt{p}$, хотя фактически показатель степени знаменателя ПФ не может изменяться от 0,5 до 1,5 [3]. Нестабильность нуля определяется по кривой Аллана на участке с нулевым наклоном, соответствующим минимальному значению угловой скорости на кривой;

4) случайное блуждание угловой скорости σ_{RRW} является винеровским случайным процессом, который формируется интегрированием белого шума с передаточной функцией $1/p$. Спектральная плотность случайного блуждания скорости обратно пропорциональна квадрату частоты. На кривой Аллана дрейф σ_{RRW} определяется по участку с наклоном + 0,5. СКО случайного блуждания скорости накапливается со временем в соответствии с соотношением

$$\sigma_{RRW}(t) = \sigma_{WN} \sqrt{T_0 t}, \quad (3)$$

где σ_{WN} – СКО порождающего белого шума.

Указанный вид шума реально измеряется гироскопом и относится к шумам неизвестной природы с очень большим временем корреляции. При этом результаты его определения зависят от изменений внешних влияющих факторов, главным образом температуры. Оценочным значением σ_{RRW} считают значение, определенное на прямой с наклоном + 0,5, в интервале, равном 3 с;

5) экспоненциально-коррелированный марковский шум с корреляцией $K_M(\tau)$ вида

$$K_M(\tau) = D_M e^{-\mu|\tau|}, \quad (4)$$

где D_M – дисперсия шума [$\text{рад}^2/\text{с}^2$]; μ – коэффициент затухания функции $K_M(\tau)$ [с^{-1}], связанный со временем корреляции соотношением $T_M = 1/\mu$.

На кривой Аллана марковский шум определяется по локальному минимуму, ограниченному слева и справа асимптотами $+0,5$ и $-0,5$ (показан на рис. 1). Указанное отличие является важным признаком идентификации марковского шума;

б) для кориолисовых гироскопов важным является также идентификация синусоидального шума, порождаемого колебаниями кромки резонатора на резонансной частоте, что формирует зашумляющий выходной сигнал ВТГ за счет псевдодетерминированной синусоидальной компоненты.

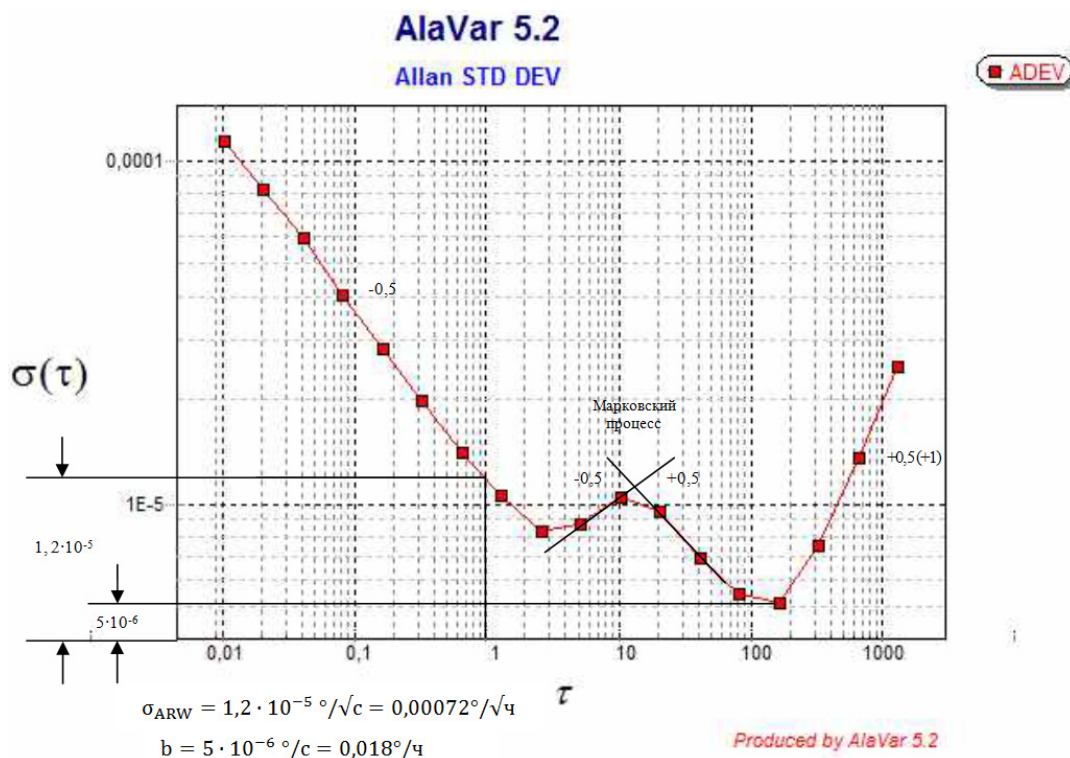


Рис. 1. График вариаций Аллана до фильтрации информационных массивов гироскопов

При частоте шума, близкой к частоте дискретизации, синусоидальный шум практически незаметен на кривой Аллана, так как теряется на фоне белого шума.

Суммарная дрейфовая составляющая с учетом значимости влияния отдельных компонент определяется в соответствии с рекомендациями [1, 4].

Анализ результатов экспериментальных исследований

1. Объектом исследования является образец ВТГ ГЕ 006 зав. № 040008, разработки и производства АО «НИИФИ».

2. Объем исследований – записи выходных сигналов ВТГ в четырех длинных запусках длительностью 3, 2, 2 и 19 ч, а также в пяти коротких запусках длительностью 5 мин каждый. Длительность перерыва между запусками – 10 мин. Накопление информационного массива проводилось в течение времени каждого запуска.

3. Обработка полученных результатов проводилась по программе AlaVar 5.2 с использованием массива Data Values и вычислением параметров PDS и $ADEV$ и представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Представленная в табл. 1 и на рис. 1 информация интерпретируется следующим образом.

На кривой Аллана отчетливо выделяются участки с наклоном $-0,5$ (σ_{ARW}), наклоном 0 (b), марковский шум в виде пересечения двух линий с наклоном $+0,5$ и $-0,5$, а также участок с наклоном от $+0,5$ до 1 (σ_{RRW}). Синусоидальный шум не идентифицирован при всех временах запуска.

Полученные результаты оценки σ_{ARW} и b (см. табл. 1) соответствуют высоким требованиям к характеристикам разработанного ВТГ ГЕ 006.

Обращает на себя внимание некоторое несоответствие σ_{ARW} и b , что можно объяснить зашумлением $1/f$ -процесса белыми и марковскими процессами.

Таблица 1

Результаты оценки случайного блуждания нуля σ_{ARW} и нестабильности нуля b в длинных и коротких запусках по вариациям Аллана

Время непрерывной работы и номер запуска	Время перерыва, мин	Результаты оценки	
		$\sigma_{ARW}, \%/ч$	$b, \%/ч$
Длинные запуски			
3 ч, запуск 1	10	0,0015	0,018
2 ч, запуск 2	10	0,0006	0,018
2 ч, запуск 3	10	0,00072	0,018
Короткие запуски – 5 мин работы, 10 мин перерыва			
запуск 4	–	0,0006	0,020
запуск 5	–	0,001	0,025
запуск 6	–	0,001	0,025
запуск 7	–	0,001	0,025
запуск 8	–	0,002	0,018

Результаты оценки дрейфов выходного сигнала с использованием классического дисперсионного анализа с временем осреднения, равным длительности запуска, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки дрейфов выходного сигнала с использованием классического дисперсионного анализа с временем осреднения, равным длительности запуска

Длительность запуска	МО, %с	СКО, %с
3 ч	-9,8140E-05	1,83582E-04
2 ч	-6,83214E-05	1,34611E-04
2 ч	-8,55897E-05	1,52900E-04
19 ч	-17,7447E-05	1,33411E-04
5 мин	1,56834E-05	1,23245E-04
5 мин	2,74534E-05	1,21902E-04
5 мин	3,87935E-05	1,24222E-04
5 мин	6,17966E-05	1,25322E-04
5 мин	6,58038E-05	1,23295E-04

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

- полученные значения математического ожидания зависят от объемов выборок;
- среднеквадратические отклонения в запуске превышают значения МО примерно вдвое и менее зависимы от объемов выборок.

Ситуацию можно объяснить тем, что указанным методом оценивается вся совокупность шумов – от белого до всех степенных.

Вследствие этого, приведенные в табл. 2 оценки, не могут быть отнесены к разряду стандартных статистических моделей.

При этом полезно сослаться на группу авторов работы [2], утверждающих, что «стандартными методами статистического анализа невозможно получить никакую оценку шумовых компонент, т.е. данные методы в данном случае совершенно бесполезны».

Оценки смещения нуля b (0,018%/ч по Аллану) и математического ожидания (МО), определенно-го методом дисперсионного анализа (0,353 %/ч), отличаются более чем в девятнадцать раз. Основанием для возможности их сравнения послужил вывод, приведенный в работе [3] о том, «что 1/f-процесс может выглядеть как детерминированный процесс с добавлением белого шума и имитировать инструментальный дрейф с изменяющимися во времени средним».

Это же заключение приводит к важному выводу о необходимости приведения структуры зашумленных детерминированных процессов в реальных образцах гироскопов к детерминированным [4, 5].

Применение для этой цели адаптивной фильтрации выходного сигнала в образце ГЕ 006 зав. № 040008 улучшило оценочные параметры табл. 2 не менее, чем на порядок для МО, и более, чем на 2 порядка для СКО, обеспечив тем самым сходимость оценок между ними, а также сходимость между МО и b .

Запись вариации Аллана для фильтрованного массива представлена на рис. 2.

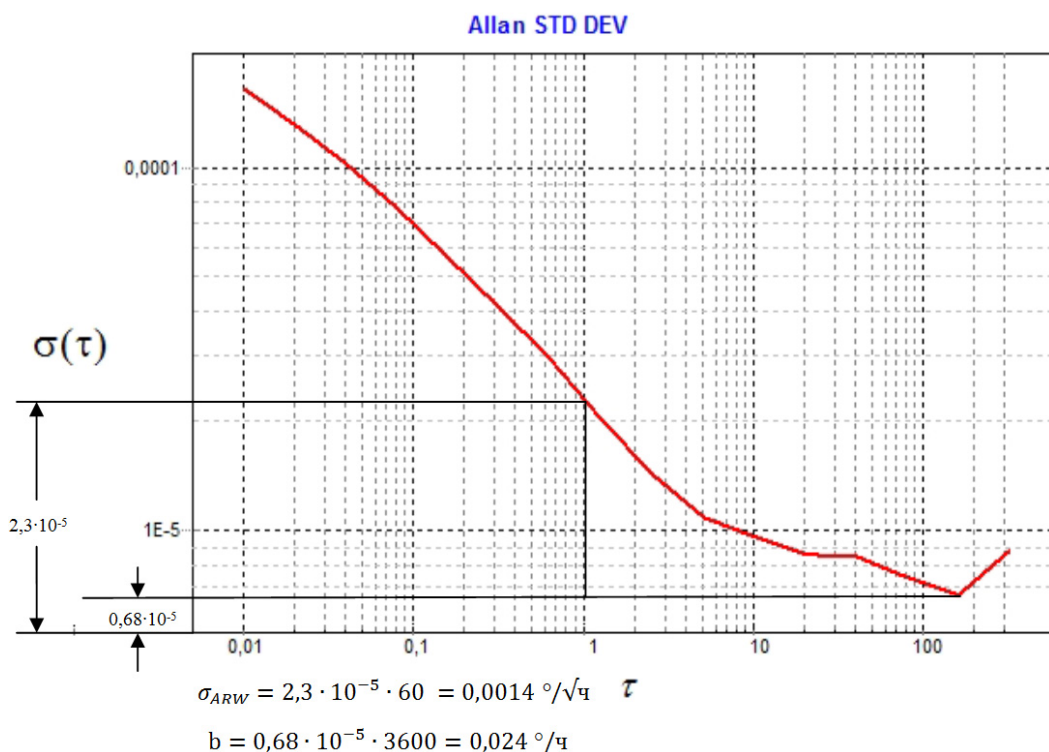


Рис. 2. График вариации Аллана после адаптивной фильтрации информационных массивов гироскопа

Сравнение кривых по рис. 1, 2 подтверждает ожидаемое изменение структуры шумов после фильтрации в виде:

- уменьшения марковских шумов;
- уменьшения наклона участка σ_{RRW} с плюс 2 до плюс 1;
- увеличения значений σ_{ARW} вдвое, а b – в 1,3 раза.

Заключение

1. В результате исследований информационных массивов ВТГ ГЕ 006 определено, что их шумовая идентификация соответствует методу вариаций Аллана и позволяет использовать его в качестве основного метода оценки дрейфовых характеристик ВТГ.

2. Статистическая обработка полученных информационных массивов отличается зависимостью математического ожидания от объемов выборки при относительно небольшом разбросе среднеквадратических значений и значительным отличием полученных числовых значений МО от смещения нуля b по Аллану.

Констатации этого факта недостаточно в связи с тем, что независимо от полученных результатов, статистические методы оценивают реальные массивы, поступающие на дальнейшую обработку в БИНС.

При этом причины получения оценок, не соответствующих ожидаемым, следует искать не в особенностях дисперсионного анализа, а в структуре самого процесса и возможностях его физического разделения на дрейфовую и детерминированную составляющие с последующим исключением детерминированной¹.

В этой связи, а также учитывая результаты предварительных оценок, актуальным можно считать дальнейшие исследования возможностей встроенной адаптивной фильтрации информационных массивов и влияние на структуру шумов и результаты оценок случайных и детерминированных составляющих.

¹ IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice of Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.

3. Можно считать эффективным совместное использование методов вариаций Аллана и классического дисперсионного анализа для выявления и исключения тех или иных источников дрейфа выходного сигнала гироскопа.

Список литературы

1. Аллан Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. 2015. № 4 (91). С. 3–28.
2. Литвин М. А., Малюгина А. А., Миллер А. Б. [и др.]. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 4. С. 326–339.
3. Miloti E. *1/f noise: a pedagogical review*. Universita di Udine and I.N.F.N., Italy, 2002.
4. Сирая Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 1. С. 1–14.

References

1. Allan D.U. Allan's variations: the history of creation, advantages and disadvantages, main areas of application. *Giroskopiya i navigatsiya = Gyroscopy and navigation*. 2015;(4):3–28. (In Russ.)
2. Litvin M.A., Malyugina A.A., Miller A.B. [et al.]. Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation. *Informatsionnye protsessy = Information processes*. 2014;14(4):326–339. (In Russ.)
3. Miloti E. *1/f noise: a pedagogical review*. Universita di Udine and I.N.F.N., Italy, 2002.
4. Siraya T.N. Statistical interpretation of the Allan variation as characteristics of measuring and navigation devices. *Giroskopiya i navigatsiya = Gyroscopy and navigation*. 2020;28(1):1–14. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Николаевна Лузгина

ведущий инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Сергей Александрович Москалев

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по развитию,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: moskalev_sa@niifi.ru

Никита Вячеславович Недопекин

начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Алексей Сергеевич Новоселов

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Oksana N. Luzgina

Leading design engineer,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Sergey A. Moskalev

Candidate of technical sciences,
deputy general director for development,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Nikita V. Nedopekin

Head of department,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Alexey S. Novoselov

General director,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Антонина Алексеевна Папко

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Алексей Владимирович Поспелов

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Antonina A. Papko

Doctor of technical sciences, chief researcher,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Alexey V. Pospelov

Chief specialist,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.02.2021

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2021

Принята к публикации/Accepted 31.03.2021