

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ШУМОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Ю. Н. Коркишко¹, В. А. Федоров², В. Е. Прилуцкий³, В. Г. Пономарев⁴,
И. В. Морев⁵, Д. В. Обухович⁶, И. В. Федоров⁷

ООО НПК Оптилинк, 124489, Москва, Зеленоград, Сосновая аллея, д. 6А, стр. 2
Тел: +7 495 6631760, Факс: +7 495 6631761, e-mail: opto@optolink.ru

Н. И. Кробка⁸

НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова (филиал ФГУП "ЦЭНКИ")
e-mail: krobkanick@msn.com

Аннотация

Ключевые слова: волоконно-оптические гироскопы, дрейф нулевого сигнала, спектральная плотность мощности шума, вариации Аллана

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи всё более широко применяются в системах инерциальной навигации. В работе исследуются точностные параметры разработанных и серийно изготавливаемых НПК «Оптолинк» одноосных ВОГ ОИУС-2000, ОИУС-1000, ОИУС-501 и ОИУС-200, отличающихся длиной и диаметром волоконного контура, а также трехосных ВОГ ТИУС-500 и блоков чувствительных элементов (БЧЭ) БЧЭ-500 и БЧЭ-501. Проведено сравнение параметров ВОГ, рассчитанных по отечественному и международному (метод вариации Аллана) стандартам. Идентифицированы основные составляющие шумов высокоточных одноосных и трехосных ВОГ компании НПК «Оптолинк».

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи всё более широко применяются в системах инерциальной навигации. В ВОГ с замкнутым контуром механизм обратной связи сохраняет нулевой уровень сигнала путем компенсации фазового сдвига Саньяка дополнительным фазовым сдвигом [1-2]. Величина этого дополнительного фазового сдвига позволяет получить информацию об угловой скорости вращения объекта.

Компания «ООО НПК «Оптолинк» является ведущим российским производителем ВОГ и бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на их основе [3-11]. В данной работе исследуются точностные параметры разработанных и серийно изготавливаемых НПК «Оптолинк» одноосных ВОГ ОИУС-2000, ОИУС-1000, ОИУС-501 и ОИУС-200, отличающихся длиной и диаметром волоконного контура, а также трехосных ВОГ типа ТИУС-500 и блоков чувствительных элементов (БЧЭ) БЧЭ-500 и БЧЭ-501.

ВОГ компании «Оптолинк» изготавливаются в так называемой минимальной конфигурации. Испытания ВОГ проводились в НПК «Оптолинк» как в лабораторных условиях при нормальных климатических условиях и температуре $20 \pm 0.4^\circ \text{C}$, так и в широком диапазоне температур (от -40 до $+60^\circ \text{C}$) в температурных камерах фирм «Tabai», «Esprec» и «Холод». Для оценки характеристик стабильности масштабного коэффициента и смещения нуля приборов как при постоянной температуре, так и в широком температурном диапазоне использовался двухосный поворотный стенд с термокамерой АС2247-ТСМ фирмы Acutronic. При этом записывалась реализации длиной не менее 10 ч. Для определения зависимости масштабного коэффициента и смещения нуля приборов от температуры их показания записывались при плавном изменении температуры от минимального допустимого значения до максимально допустимого значения и обратно. Скорость изменения температуры выбиралась в диапазоне от 4° до $60^\circ \text{C}/\text{ч}$. В связи с отсутствием отечественных государственных стандартов по методикам измерения и расчета параметров волоконно-оптических гироскопов, фактически, единственным мировым стандартом является стандарт Международного общества инженеров электроники и энергетики IEEE Std 952-1997 [12]- метод вариации Аллана – метод представления среднеквадратического отклонения (СКО) случайного смещения нуля гироскопа ($\sigma_A(\tau)$) в зависимости от времени осреднения (τ).

¹ Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор.

² Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

³ Директор Саратовского отделения.

⁴ Кандидат технических наук, ведущий конструктор, технический директор Саратовского отделения.

⁵ Ведущий инженер, руководитель группы.

⁶ Ведущий инженер.

⁷ Аспирант, инженер.

⁸ Кандидат физико-математических наук, г.н.с.

Сущность метода вариации Аллана состоит в вычислении дисперсии не самих отклонений центрированного случайного процесса, как это делается при определении классической выборочной дисперсии, а разницы соседних отклонений [12-15]. Исходя из известных для инерциальных измерителей основных физических источников возникновения шумовых составляющих и соответствующих выражений для спектральной плотности в стандарте IEEE используется аппроксимирующее выражение для зависимости изменения вариации Аллана от времени осреднения τ в виде следующего полинома

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

где N – коэффициент случайного углового ухода – спектральной плотности мощности шума (Angle Random Walk); B – коэффициент нестабильности (дрейфа) нулевого сигнала (смещения нуля) (Bias Instability); R – коэффициент линейного изменения угловой скорости (Rate Ramp); Q – коэффициент шума квантования (Quantum Noise); K – коэффициент случайного ухода угловой скорости (Rate Random Walk).

В некоторых случаях аппроксимацию (1) целесообразно дополнять составляющими, соответствующими марковским (экспоненциально коррелированным) и квазигармоническим шумам. При этом в отечественной гироскопической практике и литературе устоялся и до сих пор используется как стандартный (по умолчанию) метод определения нестабильности (дрейфа) нулевого сигнала ВОГ по СКО (1σ или 3σ) при 100-секундном осреднении, а спектральной плотности мощности шума по формуле

$$ARW = \sigma_{10} / (60\sqrt{f}), \quad [\text{град}/\sqrt{\text{ч}}], \quad (2)$$

где f – полоса пропускания прибора [Гц], σ_{10} – СКО при 10-секундном осреднении [град/ч].

В табл. 1 представлены имеющиеся в литературе результаты тестирования по методу вариации Аллана параметров прецизионных волоконно-оптических гироскопов ведущих мировых производителей, а также приведены результаты тестирований по методу вариации Аллана прецизионных и средней точности волоконно-оптических гироскопов производства НПК «Оптолинк», проведенных как самой компанией, так и сторонними организациями (см. рисунок).

Т а б л и ц а 1

Параметры волоконно-оптических гироскопов ведущих мировых и отечественных производителей, рассчитанные по методу вариаций Аллана

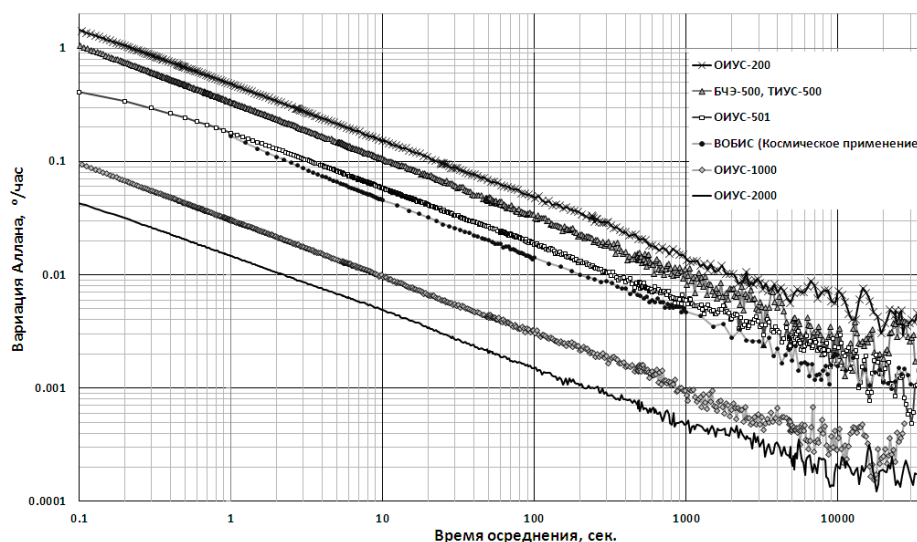
Волоконно-оптический гироскоп	Нестабильность (дрейф) нулевого сигнала, град/ч	Спектральная плотность мощности шума, град/√ч	Длина, L (км) и диаметр, d (мм) оптоволоконной катушки
IxSea FOG Marins	0.0002	0.00017	L=5, d=200
Оптолинк ОИУС-2000	0.00024	0.00026	L=2, d=250
IxSea FOG180	0.0007	0.00022	L=1.5, d=180
Оптолинк ОИУС -1000	0.0006	0.0009	L=1, d=150
IxSpace Astrix 165	0.0008	0.0009	L=2, d=200
Tokimek	0.0028	0.00078	
Emcore EMP-1.2k	0.0045	0.0017	L=1.2 км
Northrop Grumman LR-240	0.0055	0.002	
Оптолинк ОИУС-501, БЧЭ-501	0.0011	0.0023	L=0.5, d=100
Оптолинк ТИУС-500, БЧЭ -500	0.0025	0.0065	L=0.5, d=100
Оптолинк ОИУС -200	0.006	0.008	L=0.2, d=78
Физоптика VG-951	0.03	0.015	L=0.2
Emcore EMP-1	0.045	0.013	L=0.2
Litton LN-200	0.07	0.056	
KVH DSP 3000	0.15	0.055	

На основе полученных результатов в работе сделаны следующие выводы:

1. Значения точностных параметров прецизионных ВОГ компании НПК «Оптолинк», рассчитанные по международному стандарту (методу вариации Аллана) (см. табл. 1), находятся на уровне ведущих мировых изготовителей ВОГ (Northrop Grumman, IxSea, Honeywell).

2. Устоявшееся в отечественной гироскопической практике и литературе (фактически, «стандарт») определение точностных параметров прецизионных ВОГ (нестабильности (дрейфа) нулевого сигнала) по СКО при 100-секундном осреднении не является адекватным – время корреляции для нестабильности нулевого сигнала в прецизионных ВОГ составляет более 1000 с. Поэтому, СКО при 100-секундном осреднении отражает шумовую составляющую (спектральную плотность мощности шума, Random Walk), а не стабильность нулевого сигнала.

3. Значения точностных параметров прецизионных ВОГ (нестабильности (дрейфа) нулевого сигнала и спектральной плотности мощности шума), рассчитываемые по de facto отечественному стандарту (по СКО при 100-секундном и 10-секундном осреднении), в том числе и в ТУ НПК «Оптолинк», являются завышенными (ухудшенными), а для нестабильности нуля – значительно завышенными (ухудшенными ~на порядок)), по сравнению с параметрами, рассчитанными по международному стандарту (методу вариации Аллана) (табл. 2).



Вариации Аллана волоконно-оптических гироскопов, серийно изготавливаемых НПК «Оптолинк»

Таблица 2

Сравнение параметров волоконно-оптических гироскопов производства компании НПК «Оптолинк», рассчитанных по российскому и международному стандартам

Тип устройства	Нестабильность нулевого сигнала, град/ч			Спектральная плотность мощности шума, град/ $\sqrt{ч}$		
	Российский «стандарт» ($\tau=100$ с)	Вариация Аллана	Отношение	Российский «стандарт» ($\tau=10$ с)	Вариация Аллана	Отношение
ОИУС-200	0,048	0,006	0,125 (8)	0,0092	0,0081	0,87 (1,15)
ТИУС-500, БЧЭ-500	0,032	0,0025	0,078 (12,8)	0,010	0,0068	0,66 (1,52)
ОИУС-501, БЧЭ-501	0,014	0,0011	0,078 (12,8)	0,0065	0,0023	0,36 (2,8)
ОИУС-1000	0,003	0,0006	0,083 (12)	0,0008	0,00055	0,70 (1,45)
ОИУС-2000	0,0015	0,00024	0,125 (8)	0,00028	0,00025	0,91 (1,10)

В результате проведенных исследований определена математическая модель шумов ВОГ разработки и производства НПК «Оптолинк»: метод вариации Аллана позволил идентифицировать и установить следующие две составляющие шумов высокоточных одноосных ВОГ компании НПК «Оптолинк»: нестабильность (дрейфа) нулевого сигнала (Bias Instability), спектральная плотность мощности шума (Angle Random Walk).

Дополнительно в информационном сигнале ВОГ могут присутствовать:

- шум, соответствующий наклону графика Аллана +1/2 (Rate Ramp);
- марковский шум с временем корреляции (1-2) такта съема информации с ВОГ;
- шум, соответствующий периодическим и/или квазипериодическим случайным возмущениям.

Более детальную информацию о структуре шумов ВОГ позволяет получить корреляционный анализ: автокорреляционные функции шумов ВОГ нагляднее, чем вариации Аллана, демонстрируют наличие в структуре шумов ВОГ белого шума, фликкер-шумов различных типов, марковского шума и шумов, соответствующих квазипериодическим случайным возмущениям (см. правые части графиков Аллана на рис. 1). Амплитуда квазипериодических возмущений может составлять до (55-60)% от суммарной амплитуды белого шума и марковского процесса. Локализация источников этих шумов и их ослабление в

процессе дальнейшей модернизации и отработки ВОГ разработки НПК «Оптолинк» – дополнительный резерв повышения точности ВОГ и БИНС на основе ВОГ производства НПК «Оптолинк».

На основе полученных результатов разработаны технические предложения по улучшению характеристик ВОГ и повышению точности БИНС на основе ВОГ разработки НПК «Оптолинк».

Литература

1. **Lefevre H.** The Fiber -Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
2. Optical fiber rotation sensing, edited by **W.K.Burns**, Academic press, 1994.
3. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.M.Kostritskii, A.N.Alkaev, E.M. Paderin, E.I.Maslennikov, D.V.Apraksin.** Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange // in Proceedings of SPIE, Vol.4944, Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, edited by Giancarlo C. Righini, (SPIE, Bellingham, WA, 2003), pp. 262-267.
4. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Фенюк М.А., Марчук В.Г., Кострицкий С.М., Падерин Е.М.,** Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым, // Гироскопия и навигация, 2004. N1 - С.69-82.
5. **Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Фенюк М.А., Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Зуев А.И.,** Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом // Гироскопия и навигация, 2004. N3 - С.62-72.
6. **Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov, V.E. Prilutskii, V.G. Ponomarev, V.G.Marchuk, I.V.Morev, E.M. Paderin, S.M.Kostritskii, V.N.Branets, V.S.Ryzhkov.** Space grade three-axis fiber optical gyroscope // in Proc. EOS Topical Meeting on Photonic Devices in Space, October 18-19, 2006, Paris, France. Vol.5, pp.32-35.
7. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Кострицкий С.М., Падерин Е.М.** Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы // Фотон-Экспресс, 2007, 6(62), с. 47-49.
8. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Морев И.В., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Несенюк Л.П., Буравлев А.С., Лисин Л.Г.** Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Гироскопия и навигация, 2008, № 1, с.71-81.
9. **Yu.N. Korkishko, V.A.Fedorov, V.E.Prilutskii, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, S.M.Kostritskii.** Interferometric closed-loop fiber-optic gyroscopes // in Proceedings of SPIE, Vol.8351, Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, edited by John Canning, Gangding Peng, (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 83513L, pp. 83513L-1–83513L-8 (2012).
10. **Yu.Korkishko, V.Fedorov, V.Prilutskii, V.Ponomarev, I.Morev, S. Kostritskii, A.Zuev, V.Varnakov.** Closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // in Proc. Inertial Sensors and Systems - Symposium Gyro Technology 2012, Karlsruhe, Germany, 18-19 September 2012, p.14.1-14.15.
11. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, V.E.Prilutskii, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, S.M.Kostritskii, A.I.Zuev, V.K.Varnakov.** Interferometric closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // in Proceedings of SPIE, Vol.8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, edited by Yanbiao Liao, Wei Jin, David D. Sampson, Ryoza Yamauchi, Youngjoo Chung, Kentaro Nakamura, Yunjiang Rao, (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 842107, pp. 842107-1–842107-8 (2012).
12. **IEEE Std 952-1997.** IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
13. **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 – С.98-104.
14. **Сирая Т.Н.** Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация, 2010. № 2 – С.29-36.
15. **Кробка Н.И.** Дифференциальные методы идентификации структуры шумов гироскопов // Гироскопия и навигация, 2011. № 1 – С.59-77.