

УДК 531.383-11:681.7

DOI 10.53403/9785951505170_2021_26_2_300

Результаты исследований волоконно-оптического гироскопа

Представлен обзор разработок в области волоконно-оптической гироскопии. Рассмотрены результаты испытаний макета датчика угловой скорости, созданного на базе волоконно-оптического гироскопа (ВОГ).

**Е. В. Бородина, А. Ф. Габбасов,
А. Н. Парфенов, М. Р. Фомин**

Введение

ВОГ, как и лазерный, относится к типу волновых оптических гироскопов, реализующих эффект Саньяка. В настоящее время ВОГ с замкнутым контуром обратной связи широко используются для построения прецизионных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), где они выполняют функции датчиков угловой скорости (ДУС). Исходя из требований к БИНС, предназначенным для использования в составе перспективных образцов вооружения и военной техники, ДУС должны обладать высокой точностью, широким диапазоном измеряемых угловых скоростей, устойчивостью к большим перегрузкам и возмущающим воздействиям (механическим, температурным, ионизирующему излучению, магнитному полю и др.), малой массой и габаритами.

Краткий обзор состояния дел в области волоконно-оптической гироскопии

Анализ технических характеристик современных ВОГ, выполненный в РФЯЦ-ВНИИЭФ, показал, что за рубежом уже в течение нескольких лет серийно производятся системы ориентации и навигации различного назначения, использующие высокоточные ВОГ. Наиболее известными зарубежными производителями ВОГ и БИНС на их основе являются:

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

- Northrop Grumman (США, бывшая Litton) [1, 2];
- группа компаний iXBlue (Франция) [3, 4];
- KVH (США) [5];
- iMAR (Германия) [6].

В России разработкой и производством ВОГ скоростного и тактического классов точности в основном занимается компания «Физоптика» (Москва). Отечественными производителями ВОГ навигационного класса точности являются фирмы «Оптолинк» (Зеленоград) и «ПНППК» (Пермь).

В табл. 1 и 2 приведены основные характеристики зарубежных и отечественных ВОГ и инерциальных систем, построенных на их основе.

Таблица 1

Основные характеристики зарубежных ВОГ

Параметр	IXBlue (IXSea)	Northrop Grumman	KVH		iMAR
	Astrix 1000	LN-200S	DSP-1750	DSP-4000	iNAT-FSLG
Вид инерциального прибора*	ИИМ	ИИМ	ВОГ	ВОГ	БИНС
Динамический диапазон, °/с	±20	±1000	±490	±375	±600
Нестабильность МК**, ppm (1σ)	40	100	300	500	100
Нестабильность дрейфа нуля, °/ч	0,003	0,1	3,000	6,000	0,100
Случайный дрейф, °/√ч	0,002	0,007	0,013	0,067	0,010
Температурный диапазон, °С	–25–60	–54–71	–40–75	–40–70	–40–65
Случайная вибрация (СКЗ)*** в диапазоне 20–2000 Гц, g	20	15	8	8	6
Механический удар, g	2000	1500	25	40	6
Средняя наработка на отказ, ч	15 лет****	20 000	36 000	55 000	35 000

Примечание: * – вид инерциального прибора, в состав которого входит ВОГ. Здесь ИИМ – инерциальный измерительный модуль, ** – МК – масштабный коэффициент, *** – СКЗ – среднеквадратичное значение, **** – срок службы на геостационарной орбите (радиационная стойкость до 100 крад).

Таблица 2

Основные характеристики отечественных ВОГ

Параметр	«Физоптика»		«Оптолинк»		ПНППК	
	ВГ091-3Д	ВГ991Д	ВОБИС	ТИУС-500	ДУС-500	ВОГ-06/120
Динамический диапазон, °/с	±300	±130	±30	±300	±500	±500
Нестабильность МК, ppm	1000	1000	500	1000	1000	100
Случайный дрейф, °/√ч	0,040	0,030	0,001	0,010	0,003	–
Температурный диапазон, °С	–40–70		–30–40	–40–60	–60–60	–40–60
Случайная вибрация (СКЗ) в диапазоне 20–2000 Гц, g	6	12	–	2	–	8
Средняя наработка на отказ, ч	20 000	60 000	15 лет*	20 000	–	

Примечание: * – срок службы на геостационарной орбите (радиационная стойкость до 500 крад).

Анализ технических характеристик современных ВОГ показал следующее:

– в России существует отставание от зарубежного уровня в области ВОГ навигационного класса точности;

– величина нестабильности МК ВОГ в настоящее время не превышает $\sim 10^{-4}$, что примерно на два порядка хуже, чем у лазерных гироскопов;

– приведенные характеристики ВОГ свидетельствуют о возможности эксплуатации приборов в достаточно сложных условиях, в т.ч. при эксплуатации на космических аппаратах. Однако, на данный момент в России не существует ВОГ, удовлетворяющих требованиям стойкости к экстремальным факторам;

– в России практически отсутствуют компоненты (из состава функциональных узлов ВОГ), обладающие стойкостью к экстремальным факторам: излучатели и приемники лазерного излучения с длиной волны 1,55 мкм; оптоволоконно, сохраняющее поляризацию, ряд аналоговых микросхем (операционные усилители, цифроаналоговые преобразователи, термодатчики и др.).

Таким образом, одной из основных научно-технических проблем, которые необходимо решить для использования ВОГ в составе БИНС перспективных образцов вооружения и военной техники, является обеспечение требуемых величин точностных параметров ВОГ (прежде всего, погрешности МК в рабочем диапазоне угловых скоростей и температур, а также в условиях воздействия внешних факторов).

Результаты исследований макета ДУС на базе ВОГ

С целью исследования возможности решения указанной выше проблемы в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан и изготовлен макет ДУС на базе ВОГ (ДУС-ВОГ), предназначенный для экспериментальных исследований характеристик современного отечественного ВОГ и определения возможных путей улучшения показателей стойкости ВОГ к внешним воздействующим факторам. В состав ДУС-ВОГ входят:

– гироскоп волоконно-оптический ВОГ-06/120, изготовленный ПАО «ПНППК» (Пермь). Прибор выполнен на импортной элементной базе широкого применения с частичным применением отечественных пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, кварцевых генераторов);

– макет блока питания, разработанный и изготовленный РФЯЦ-ВНИИЭФ. Макет полностью выполнен на отечественной элементной базе.

Целью экспериментальных исследований ДУС-ВОГ являлось определение диапазона измеряемой угловой скорости, погрешности МК в диапазоне угловых скоростей, постоянной составляющей смещения нуля, нестабильности смещения нуля от запуска к запуску, нестабильности смещения нуля в запуске, величины зоны нечувствительности ДУС-ВОГ. Также оценивались влияние температурного и магнитного воздействия на выходной сигнал ДУС-ВОГ, стойкость макета к воздействию линейного ускорения, случайной вибрации, механических ударов одиночного действия.

В качестве испытательного оборудования, с помощью которого проводились исследования, использовали одноосный (с термокамерой) и трехосный динамические стенды, прецизионный центробежный стенд, вибростенд и имитатор знакопеременных магнитных полей. Результаты определения точностных характеристик ДУС-ВОГ в диапазоне температур от -40 до 60 °С представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований макета ДУС-ВОГ в диапазоне температур от -40 до 60 °С

Характеристика ВОГ	Задаваемая температура		
	(24 ± 2) °С	-40 °С	60 °С
Диапазон измеряемой угловой скорости, °/с	$(-1000; 1000)$	–	–
Нестабильность МК, отн. ед.	$0,431 \cdot 10^{-4}$	–	–
Нелинейность МК, отн. ед.	$0,746 \cdot 10^{-4}$	–	–
Постоянная составляющая смещения нуля, °/ч	0,022	0,0639	0,0151
Нестабильность смещения нуля от запуска к запуску, °/ч	0,004	0,0053	0,0084
Нестабильность смещения нуля в запуске, °/ч	0,015	0,0515	0,0240
Величина зоны нечувствительности, °/ч	$\pm 0,063$	–	–

На рис. 1 представлен типичный график изменения угловой скорости, измеренной ДУС-ВОГ (при вращении планшайбы с постоянной скоростью $0,005$ °/с), при выставке оси чувствительности ВОГ на восток.

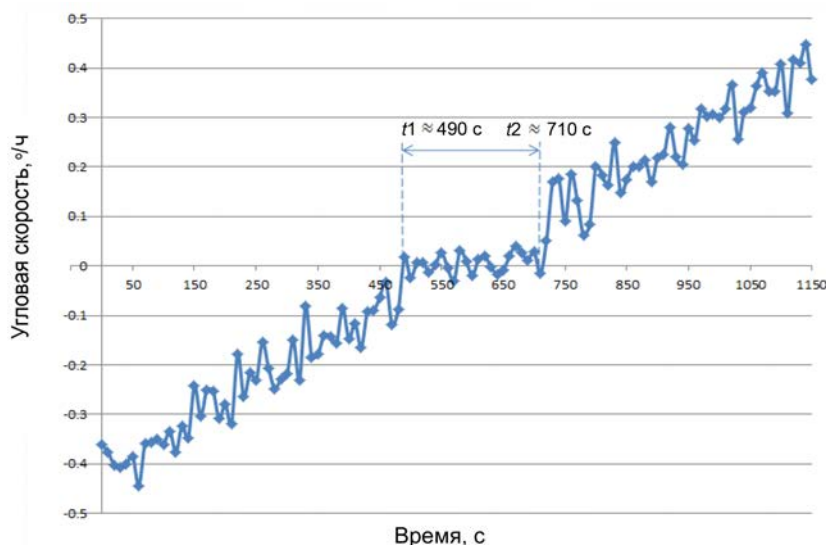


Рис. 1. График изменения угловой скорости от времени измерения

Из табл. 3 следует, что ДУС-ВОГ обеспечивает высокие точностные характеристики (навигационного класса точности) в диапазоне температур от -40 до 60 °С.

Исследования ДУС-ВОГ при воздействии механических внешних факторов проведены для уровней, в целом соответствующих значениям, заявленным производителем ВОГ-06/120. Получены следующие результаты:

- при воздействии линейных ускорений до 50 g максимальная величина нестабильности смещения нуля в запуске не превысила $\sim 0,020$ °/ч, а максимальное отличие расчетного значения проекции тестовой скорости от средней скорости, измеренной ДУС-ВОГ, не превысила $\sim 0,065$ °/с;
- при воздействии случайной вибрации с СКЗ ускорения 6 g в диапазоне частот 20 – 1000 Гц максимальное значение накопленного за время измерения угла не превысило ~ 2 угл. мин, а максимальное нулевого сигнала ДУС-ВОГ составило $\sim 0,03$ °/ч;

– при воздействии механического удара одиночного действия с пиковым ударным ускорением до 50 g максимальное значение накопленного за время измерения угла не превысило $\sim 0,32$ угл. мин, а максимальное значение нулевого сигнала ДУС-ВОГ составило $\sim 0,16$ $^{\circ}/ч$.

Исследования ДУС-ВОГ при воздействии постоянного магнитного поля напряженностью до 100 Э проведены для двух положений оси чувствительности ВОГ относительно вектора напряженности магнитного поля, задаваемого с помощью имитатора магнитных полей:

– при вертикальном положении – ось чувствительности ВОГ направлена вертикально вверх и перпендикулярна плоскости, в которой расположен вектор напряженности магнитного поля;

– при горизонтальном положении – ось чувствительности ВОГ находится в плоскости, в которой расположен вектор напряженности магнитного поля, но отклонена от него на углы 0, 90, 180, 270 $^{\circ}$.

На рис. 2 и 3 показаны типичные графики изменения проекции скорости вращения Земли, измеренной ДУС-ВОГ до, во время и после воздействия постоянного магнитного поля при вертикальном и горизонтальном 270 $^{\circ}$ положениях оси чувствительности ВОГ.

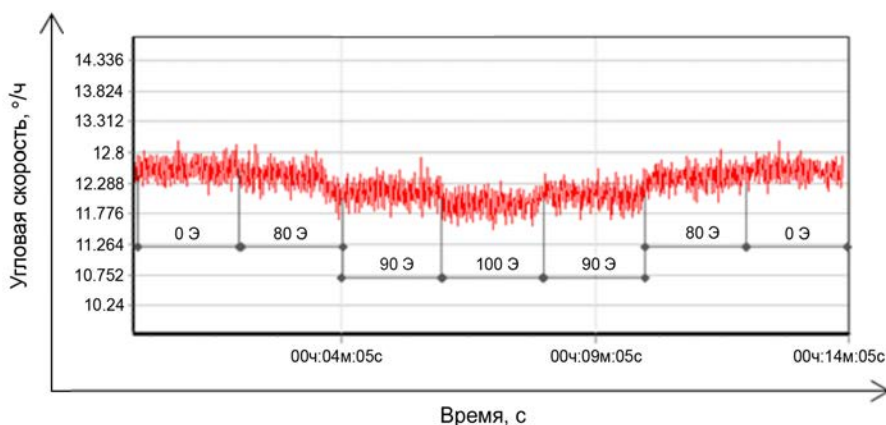


Рис. 2. Изменения проекции угловой скорости, измеренной ДУС-ВОГ при вертикальном положении оси чувствительности

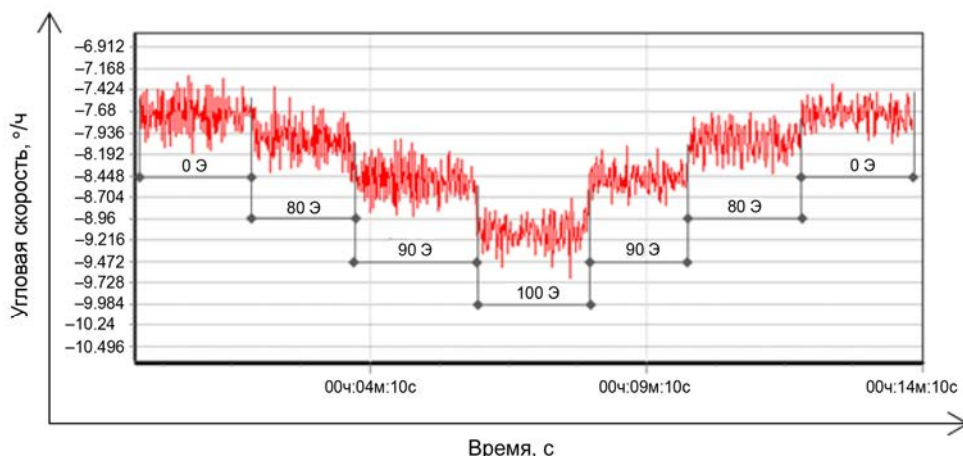


Рис. 3. Изменения проекции угловой скорости, измеренной ДУС-ВОГ при горизонтальном 270 $^{\circ}$ положении оси чувствительности

По результатам проведенных исследований установлено, что на точностные характеристики ДУС-ВОГ заметное влияние оказывает постоянное магнитное поле со следующими параметрами:

- при вертикальном положении – $H \geq 75$ Э;
- при горизонтальном положении – $H \geq 50$ Э.

Максимальное значение дрейфа нуля ДУС-ВОГ при воздействии магнитного поля напряженностью 100 Э составило $-1,43$ °/ч (для горизонтального 270° положения оси чувствительности ВОГ).

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что ВОГ можно использовать в составе БИНС объектов наземного, морского и авиационного применения, к которым не предъявляются высокие требования стойкости к внешним воздействующим факторам.

Список литературы

1. [Электронный ресурс] <http://www.northropgrumman.com>.
2. Strus J. M., Kirkpatrick M., Sinko J. GPS/IMU development of a high accuracy pointing system for maneuvering platforms // Inside GNSS. 2008. N 3. P. 30–37.
3. Лефевр Э. К. Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы // Гироскопия и навигация. 2012. № 4 (79). С. 3–9.
4. [Электронный ресурс] <http://www.ixblue.com>.
5. [Электронный ресурс] <http://www.kvh.com>.
6. [Электронный ресурс] <http://www.imar-navigation.de>.

Research Results of the Fiber-Optic Gyro

E. V. Borodina, A. F. Gabbasov, A. N. Parfenov, M. R. Fomin

The article presents an overview of the development in the field of fiber-optic gyroscopic technologies. Test results of a prototype angular velocity sensor based on the fiber-optic gyro are considered.