

УДК 621.77(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук,
В. В. Пальчик

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

Институт аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: iacs@nau.edu.ua

Выполнен обзор состояния разработки волоконно-оптических датчиков угловой скорости ближнего и дальнего зарубежья. На основании анализа характеристик датчиков приведены рекомендации по их использованию в аэрокосмических приложениях. Представлены тенденции развития современных волоконно-оптических датчиков угловой скорости.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, интерферометр, состояние разработки, тенденции развития.

Введение. Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) играют большую роль в современных гиротехнологиях, пришедших на смену традиционным электромеханическим гироскопам. Сегодня в аэрокосмических приложениях наиболее часто используются лазерные гироскопы. Но они являются недостаточно надежными вследствие использования газовых лазеров и сигналов высоких напряжений для управления приводами [1]. Альтернативные навигационные и инерциальные технологии включают GPS, MEMS-гироскопы, но большинство из этих технологий обычно используются в приложениях, не требующих высокой точности, поскольку имеются существенные ограничения по точности, скорости и надежности. Кроме того, в условиях атмосферных помех доступ к GPS может быть запрещен.

Преимуществами ВОГ являются отсутствие подвижных частей, мгновенная готовность без традиционного времени «разогрева», переменная чувствительность, зависящая от длины намотки волоконного датчика. Однако массогабаритные характеристики и стоимость ВОГ часто являются ограничивающим фактором для их применения в приложениях с высокими требованиями, прежде всего за счет необходимости использования приемо-передающих устройств и волокон, сохраняющих поляризацию проходящего излучения.

Развитие интерференционных волоконно-оптических гироскопов, наблюдающееся в течение последних лет, обусловлено как улучшениями архитектуры и методов оптимальной обработки сигналов, так и прогрессом волноводных технологий. Эти достижения привели к важным разработкам в области волоконно-оптической связи, а именно к одномодовым и сохраняющим поляризацию проходящего излучения волокнам, полупроводниковым диодам, интегрированной оптике, линейным волоконным компонентам и волокнам с эффектом усиления на материалах, легированных редкоземельными элементами [2]. В зависимости от точности и назначения ВОГ могут быть классифицированы (табл. 1) [1].

Таблица 1

Классификация волоконно-оптических гироскопов по точности и назначению

Точность	Назначение
100 град/ч	Робототехника, автомобильная промышленность
10 град/ч	Стабилизация вертолетов
1 град/ч	Определение пространственной ориентации подвижных объектов
0,1 град/ч	Гироскопы, телекоммуникационные спутники
0,01 град/ч	Научные спутники, авионика, системы управления ракетами, кораблями и подводными лодками
0,001 град/ч	Аэрокосмические объекты высокоточного применения

Постановка задачи. Целью работы является обзор существующего состояния разработки волоконно-оптических датчиков на основе анализа информации о существующих измерителях, а также выявление основных тенденций их развития. Проведенное исследование поможет в выборе измерителей для перспективных систем навигации и стабилизации информационно-измерительных устройств.

Основные особенности волоконно-оптических датчиков угловой скорости. Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка, в соответствии с которым в кольцевом интерферометре вырабатывается разность фаз $\Delta\varphi_R$, пропорциональная скалярному произведению вектора скорости вращения и вектора площади, образованной замкнутым светопроводом. Математически эффект Саньяка описывается формулой

$$\Delta\varphi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega,$$

где L – общая длина катушки; D – средний диаметр катушки; Ω – составляющая угловой скорости, параллельная оси катушки; c – скорость света в вакууме.

Такое математическое представление эффекта Саньяка связано с тем, что по сравнению с частотой понятие длины оптической волны в вакууме λ является более распространенным.

Увеличить или уменьшить чувствительность ВОГ можно путем изменения площади чувствительной катушки. Эта геометрическая гибкость является важным технологическим преимуществом, поскольку одни и те же компоненты и сборочные технологии могут быть использованы для создания разных модификаций одного и того же измерителя без существенной модернизации. Примеры таких вариаций приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2

Примеры влияния конструктивных параметров на чувствительность ВОГ

Чувствительность	L , км	D , см	λ , нм	$\Delta\varphi_R / \Omega$, с	Ω_s , град/с	Ω_h , град/ч
Высокая	1	10	1550	1,35	133	0,15
Средняя	0,2	3	850	0,15	1220	1,4

Точностные характеристики ВОГ повышенной точности во многом зависят от характеристик его основных элементов и особенностей методик его сборки. Одна из возможных структурных схем ВОГ показана на рис. 1 [3].

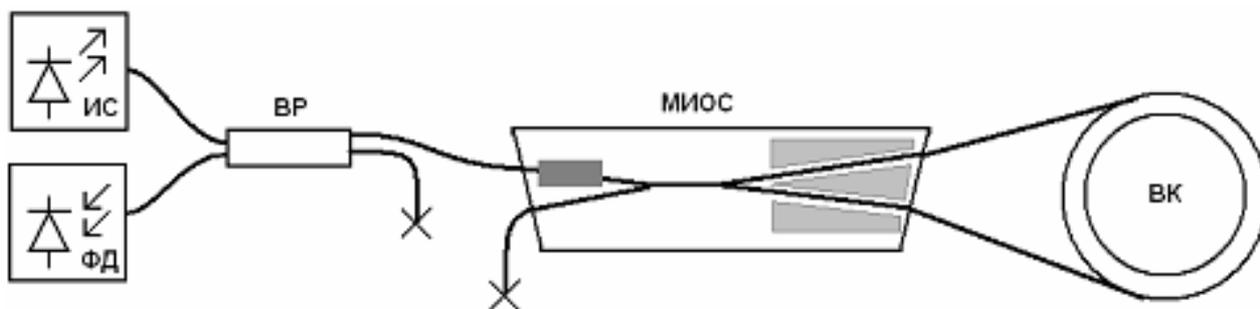


Рис. 1. Структурная схема ВОГ: ИС – источник оптического излучения; ФД – фотоприемник; ВР – волоконный разветвитель; МИОС – многофункциональная интегрально-оптическая схема; ВК – волоконный контур

Основные факторы, влияющие на точность ВОГ, суть их действия и пути устранения [4] приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные факторы, влияющие на точность ВОГ, и механизм их действия

Фактор	Механизм действия
Оптические потери	Чувствительность ВОГ ограничена дробовым шумом, который вычисляется как величина, обратная квадратному корню мощности
Тепловые помехи	Зависящий от времени температурный градиент вдоль длины волокна может привести к ложным фазовым сдвигам вследствие температурной зависимости показателя преломления волокна. Для минимизации этого эффекта необходимо использовать волокна с меньшим значением dn/dT . Квадрупольная намотка, в которой равноотстоящие от центра точки волокна расположены в физически равных условиях, также значительно уменьшает этот эффект
Обратное рассеяние света	Обратное рассеяние на входных/выходных соединителях и других неоднородностях интерференционных ВОГ может являться причиной возникновения паразитных интерференций. Иммерсионные элементы для уменьшения разностей показателей преломления, а также использование наклонных поверхностей в МИОС снижают обратное рассеяние
Оптический эффект Керра	Электрические поля распространяющихся в противоположных направлениях лучей могут привести к таким изменениям показателя преломления, которые будут невзаимными, если свет расщепляется на неравные части. Невзаимность, вызванная нелинейным эффектом Керра, может быть существенно снижена путем использования низкокогерентного источника излучения
Магнитооптический эффект	Магнитооптический эффект Фарадея приводит к паразитному дрейфу гироскопа. Значительное уменьшение его влияния достигается путем использования волокон, сохраняющих поляризацию излучения, а также за счет использования оболочек из пермаллоя

Обзор состояния производства микроэлектромеханических датчиков угловой скорости ближнего зарубежья. В настоящее время ВОГ разработки ближнего зарубежья широко используются в системах управления, в том числе стабилизации и навигационных системах. Существующие ВОГ обеспечивают широкий точностной диапазон: от 10 до 0,001 град/ч. В России лидером производства ВОГ являются предприятия «Физоптика» и «Оптолинк».

«Физоптика» выпускает гироскопы скоростного и среднего классов точности со стабильностью сдвига нуля от 100 до 0,4 град/ч. Наиболее точными моделями являются ВГ035 и ВГ951 [3]. Обе модели представляют собой гироскопы среднего класса точности. В самых точных гироскопах «Физоптики» длина волокна составляет 200 м. Для внесения невзаимного фазового сдвига применяется модулятор на основе пьезокерамики. Что касается технологии изготовления, то для удешевления производства применяются открытая схема обработки и цельно-волоконная технология изготовления.

Параметры ВОГ, выпускаемых компанией «Физоптика», приведены в табл. 4 [5].

Производством гироскопов навигационного класса точности в России занимается компания «Оптолинк», которая производит гироскопы ОИУС-1000, ОИУС-2000 [3] и т.д.

Для обеспечения широкого динамического диапазона измерения скоростей применяется закрытая схема обработки информации. Длина волокна в волоконном контуре составляет 1000 и 2000 м для гироскопов ОИУС-1000, ОИУС-2000 соответственно. В качестве модулятора в таких гироскопах применяется интегрально-оптическая схема на ниобате лития на основе протонно-обменных волноводов. Для уменьшения чувствительности выходного сигнала гироскопа к внешнему магнитному полю применяются магнитные экраны из пермаллоя.

Таблиця 4

Основные параметры волоконно-оптических датчиков, выпускаемых ООО «Физоптика»

Тип датчика	ВГ-910	ВГ-910С	ВГ-910Ф	ВГ-910Q	ВГ-941-3AS	ВГ941-3AM	ВГ-07П	ВГ941-3Б
Параметр	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max
Масштабный коэффициент (МК), (+20 °С), мВ/град/с	45/65	8/12	5,5/8,5	5,5/8,5	2,7/3,9	3,0/4,4	3,0/4,4	2,4/3,6
Нестабильность МК при постоянной температуре, 1 СКО, %	-/0,2	-/0,2	-/0,1	-/0,1	-/0,2	-/0,1	-/0,2	-/0,2
Невоспроизводимость МК при постоянной температуре, 1 СКО, %	-/0,6	-/0,6	-/0,3	-/0,3	-/0,6	-/0,2	-/0,6	-/0,6
Температурный коэффициент МК, %/°С	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1
Сдвиг нуля (+20 °С), мВ	-/20	-/10	-/0,4	-/0,4	-/0,5	-/0,4	-/0,5	-/10
Нестабильность сдвига нуля при постоянной температуре, 1 СКО, град/ч	-/30	-/30	-/10	-/7	-/100	-/40	-/100	-/100
Невоспроизводимость сдвига нуля при постоянной температуре, 1 СКО, град/ч	-/60	-/60	-/20	-/15	-/180	-/80	-/180	-/180
Температурный коэффициент сдвига нуля, мкВ/°С	-/100	-/50	-/3	-/3	-/5	-/3	-/5	-/50
Максимально измеряемая угловая скорость, град/с	200/-	200/-	300/-	300/-	500/-	500/-	400/-	500/-
Спектральная плотность шумовой составляющей выходного сигнала, мкВ $\sqrt{\text{Гц}}$	-/50	-/10	-/15	-/15	-/10	-/15	-/10	-/10
Время готовности, с	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,02	-/0,2	-/0,02	-/0,2
Ток потребления +5В (+20 °С, мА)	-/140	-/150	-/180	-/180	-/140	-/180	-/140	-/150
Полоса частот по уровню 0,7, не менее, Гц	800/-	800/-	400/-	400/-	800/-	400/-	800/-	800/-
Габариты (без разъема), мм	82 × 82 × 20				∅24 × 51	27 × 35 × 60		∅27 × 58
Масса (примерно), г	130			80	30	80	50	50
Напряжения питания, В	+ 5 ± 16	+ 4,9 В ... + 5,1 В						
Удар (прочность)	90 g, 1 мс			90 g, 1 мс				
Вибрация (шум) частота, амплитуда (СКО)	20 Гц... 2 кГц		20-500 Гц	20 Гц ... 2 кГц		20-500 Гц	0.02-2кГц	
	6 g		6 g					
Диапазон рабочих температур, °С	-30...+ 70		-30...+ 70			-55...+ 60		-30...+ 70
Предельная температура (<2ч), °С	-55...+ 85					-60...+ 85		-55...+ 85

Окончание табл. 4

Тип датчика	ВГ-949П	ВГ-991	ВГ-951	ВГ-035П	ВГ-035К	ВГ-035С-01
Параметр	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max
Масштабный коэффициент (МК), (+20 °С), мВ/град/с	5,0/7,4	13/19	20/28	17/24	17/24	17/24
Нестабильность МК при постоянной температуре, 1 СКО, %	-/0,2	-/0,1	-/0,1	-/0,1	-/0,1	-/0,1
Невоспроизводимость МК при постоянной температуре, 1 СКО, %	-/0,6	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2
Температурный коэффициент МК, %/°С	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1
Сдвиг нуля (+20 °С), мВ	-/0,5	-/0,4	-/0,4	-/0,4	-/0,4	-/0,4
Нестабильность сдвига нуля при постоянной температуре, 1 СКО, град/ч	-/60	-/4	-/2	-/2	-/0,7	-/0,7
Невоспроизводимость сдвига нуля при постоянной температуре, 1 СКО, град/ч	-/120	-/8	-/4	-/4	-/4	-/4
Температурный коэффициент сдвига нуля, мкВ/°С	-/5	-/3	-/3	-/3	-/3	-/3
Максимальная измеряемая угловая скорость, град/с	300/-	150/-	80/-	100/-	100/-	100/-
Спектральная плотность шумовой составляющей выходного сигнала, мкВ $\sqrt{\text{Гц}}$	-/10	-/15	-/15	-/15	-/15	-/7
Время готовности, с	-/0,02	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2
Ток потребления +5 В (+20 °С, мА)	-/140	-/180	-/180	-/180	-/180	-/180
Полоса частот по уровню 0,7, не менее, Гц	800/-	400/-	400/-	400/-	400/-	400/-
Габариты (без разъема), мм	63×63×22	∅117×21	∅150×32	∅133×30		
Масса (примерно), г	50	300	330	250		
Напряжения питания, В	+4,9 В ... + 5,1 В					
Удар (прочность)	40 г, 1 мс					
Вибрация (шум) частота, амплитуда (СКО)	20 Гц ... 500 Гц 2 g					
Диапазон рабочих температур, °С	-30...+70					
Предельная температура (<2ч), °С	-55...+85					

Примечание: СКО – среднеквадратическое отклонение.

В настоящее время в инерциальной навигации широко применяются ВОГ с замкнутым контуром обратной связи, например, одноосный ВОГ ОИУС-1000 производства компании «Оптолинк» с длиной волоконного контура 500 м [4]. Эти ВОГ изготавливаются в минимальной конфигурации с одинаковыми оптическими путями для двух лучей, распространяющихся в волоконном контуре.

Типичная структурная схема ВОГ серии ОИУС [4] показана на рис. 2.

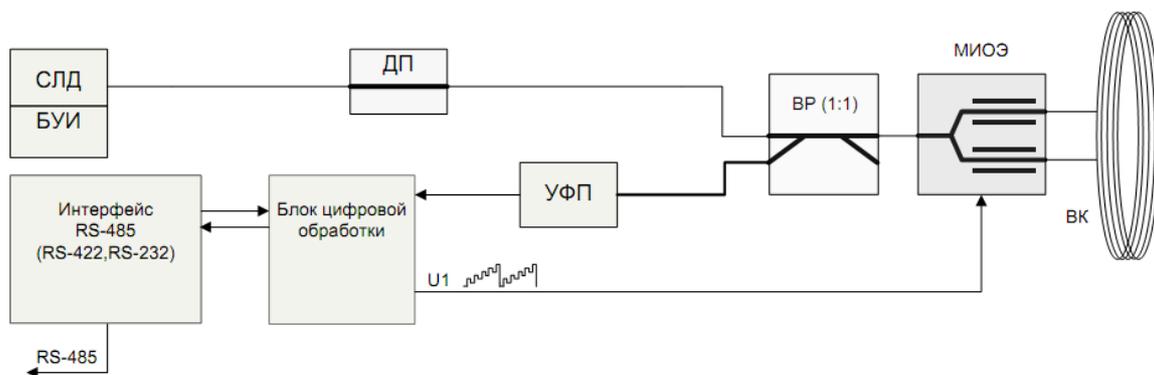


Рис. 2. Структурная схема ВОГ ОИУС-1000: СЛД – суперлюминесцентный диод; БУИ – блок управления излучателем; ВР – волоконный разветвитель; ВК – волоконный контур; МИОЭ – многофункциональный интегральный оптический элемент; УФП – устройство фотоприемное; ДП – деполяризатор; RS-485 – последовательный интерфейс

Характеристики основных ВОГ производства компании «Оптолинк» [6] приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики основных ВОГ производства компании «Оптолинк»

Характеристики	ОИУС-2000	ОИУС-1000	ОИУС-501	ОИУС-200	ОИУС-500	ТИУС-200
Количество осей	одна	одна	одна	три	три	три
Диапазон измерения, град/с	± 40	± 100	± 250	± 750	± 300	± 750
Смещение нуля, град/с	$<0,005$	$<0,01$	$<0,1$	$<0,2$	$<0,5$	$<10,0$
Смещение нуля в диапазоне $-30 \dots 50^\circ\text{C}$, град/ч	$<0,01$	0,05	0,3	0,5	1,0	30,0
Погрешность масштабного коэффициента, %	0,008	0,01	0,05	0,01	0,1	0,5
Спектральная плотность шума, град/ $\sqrt{\text{ч}}$	0,001	0,002	0,008	0,02	0,01	0,02
Полоса пропускания, Гц	50	100	250	400	300	500
Масса прибора, кг	1,7	0,8	0,4	0,22	1,1	0,4
Габаритные размеры, мм	$\varnothing 250 \times 40$	$\varnothing 150 \times 40$	$\varnothing 100 \times 30$	$\varnothing 70 \times 28$	$110 \times 110 \times 90$	$\varnothing 61 \times 90$
Выходной сигнал	RS232/RS485/RS422					
Потребляемая мощность, Вт	7,0					
Напряжение, В	5,0					

В основном приборы компании «Оптолинк» предназначены для эксплуатации при следующих условиях: температуре окружающей среды в диапазоне от -40 до $+60^\circ\text{C}$ и скорости изменения температуры не более $0,4^\circ\text{C}/\text{мин}$; давлении до $10-4$ мм рт. ст.; относительной влажности от 20 до 70% ; напряжении питания в интервале $5 \pm 0,25$ В.

Приведенные требования свидетельствуют о возможности эксплуатации приборов в достаточно сложных условиях, в том числе при эксплуатации на космических подвижных объектах.

Обзор характеристик волоконно-оптических гироскопов разработки дальнего зарубежья. Наиболее известными зарубежными производителями ВОГ являются такие фирмы, как Northrop Grumman, Honeywell, Ixsea, KVH и т. д. Компания Northrop Grumman разработала семейство гироскопов FOG 200/45. Этот гироскоп относится к гироскопам среднего класса точности и имеет закрытую схему обработки информации или минимальную схему [3]. Волоконный контур гироскопа построен на основе волокна с сохранением поляризации и эллиптической сердцевиной длиной 200 м. В зависимости от области практического применения волоконный контур имеет различные формы и максимальный диаметр $30 - 60$ мм. Гироскоп имеет следующие характеристики: нестабильность от пуска к пуску меньше 1 град/ч; нестабильность нуля меньше 1 град/ч в диапазоне температур от -40 до $+71^\circ\text{C}$.

Разработчиком гироскопа FOG180 является фирма **Ixsea** (ранее Photonetics). Гироскоп FOG180 имеет ту же архитектуру, что и предыдущая модель этой фирмы FOG120. Различие заключается в размерах диаметра и длины волокна. FOG120 имеет длину волокна 1000 м и средний диаметр волоконного контура 100 мм, а FOG180 – 3400 м 150 мм соответственно [3]. Источник света выполнен на оптическом волокне, легированном ионами эрбия, и имеет центральную длину волны излучения 1560 нм. Конструктивно гироскоп FOG180 разделен на две части: оптический чувствительный блок и блок электроники. Гироскоп FOG180 имеет

следующие основные характеристики: спектральную плотность шума $0,00022 \text{ град}/\sqrt{\text{ч}}$; стабильность нуля при температуре от -20 до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ – $0,003 \text{ град}/\text{ч}$; динамический диапазон измерения $\pm 30 \text{ град}/\text{с}$; потребляемую мощность – 3 Вт .

Одним из основных производителей ВОГ является **фирма Honeywell**. Особенностью изготовления гироскопов этой фирмы является то, что в некоторых моделях гироскопов на катушку вместо волокна с сохранением поляризации наматывается обычное стандартное волокно, которое подсоединяется к многофункциональной интегрально-оптической схеме через оптические деполяризаторы [3]. Фирма также разработала гироскопы уменьшенной стоимости на стандартном одномодовом волокне с дрейфом $0,1$ и $0,01\text{--}0,003 \text{ град}/\text{ч}$. Вместе с тем фирма Honeywell имеет разработки гироскопов высокой точности с дрейфом $0,001 \text{ град}/\text{ч}$, в котором используется волокно с сохранением поляризации. При этом длина использованного волокна составляет 2 км , а внешний диаметр катушки 14 см . В схеме применяется эрбиевый суперлюминесцентный волоконный источник света со спектром от $1,53$ до $1,56 \text{ нм}$ и мощностью излучения 5 мВт . Многофункциональная интегрально-оптическая схема выполнена на ниобате лития.

Среди компаний, разрабатывающих ВОГ для стабилизации углового положения и наведения, важное место занимает **компания KVH** (США). Основной особенностью этой компании является использование улучшенного так называемого E Core оптоволокна [7]. Такая конструкция при использовании одномодового волокна позволяет обеспечить исключительные долгосрочные поляризационные характеристики и таким образом решить основную проблему проектирования высокоточных ВОГ. Следует отметить, что KVH является производителем, который использует только волокно собственного изготовления. Технология E Core позволяет создавать высокоточные гироскопы, способные функционировать в жестких условиях эксплуатации. Волоконно-оптические гироскопы производства этой компании являются высоконадежными вследствие отсутствия подвижных частей, устойчивы к воздействию вибрации, ударов и ускорений, а также отличаются стабильностью характеристик в условиях воздействия температуры. Такие особенности делают эти датчики пригодными для использования в навигации и системах стабилизации, в том числе устройств, эксплуатируемых на подвижных объектах широкого класса. Эти датчики выпускаются как с аналоговым, так и с цифровым выводом.

Волоконно-оптические гироскопы, производимые компанией KVH, разделяются на следующие группы [7].

1. **E Core 1000** – недорогие датчики для систем стабилизации и определения положения в пространстве для коммерческих приложений.

2. **E Core 2000** – прецизионные датчики для систем стабилизации и определения положения в пространстве с повышенными требованиями. Эти робастные датчики с низким уровнем шумов и высокими характеристиками выпускаются как с аналоговым, так и с цифровым выходом. Они способны измерять угловые скорости до $100 \text{ град}/\text{с}$, при этом порог чувствительности составляет $0,01 \text{ град}/\text{с}$, а полоса пропускания – 100 Гц . Характеристики по уходу составляют $2 \text{ град}/\text{ч}$.

3. **Core 3000** – тактические скоростные гироскопы. Эти датчики являются идеальными чувствительными элементами для систем стабилизации, навигации и точного указания. Они характеризуются исключительно низким уровнем шумов и робастностью к вибрации та ударам. Кроме того датчики имеют малые массо-габаритные характеристики и модульное исполнение, что позволяет создавать на их основе инерциальные измерительные блоки. В состав датчика входит электронный блок на основе цифрового сигнального процессора, что обеспечивает стабильность и линейность масштабного коэффициента и повторяемость.

4. **E Core 4000** – датчики для систем стабилизации и определения положения в пространстве, отвечающие стандартам повышенной точности. В этой серии выпускаются одноосные и двухосные датчики и допускается создание трехосного измерительного блока.

Датчики этой серии характеризуются высокой разрешающей способностью, широкой полосой пропускания, низкими шумами, устойчивостью к воздействию вибрации, ударов, ускорений. Они могут с успехом применяться для стабилизации измерительных устройств, эксплуатируемых на подвижных объектах. В основу разработки датчиков положены предыдущие достижения серии E Core 3000, но при этом внесены существенные изменения в части характеристик смещения и масштабного коэффициента. Целесообразной областью применения датчиков является управление положением платформы, стабилизированное указание ориентира, стабилизация антенн, оптических систем и телекамер.

Датчики серии E Core 4000 выпускаются в двух исполнениях – высокой динамики (HD) и высокого качества (HP), что подтверждает универсальность этой серии. Датчики серии E Core 4000HD способны обеспечить оптимальную стабилизацию в условиях высокочастотной окружающей среды. Датчики серии E Core 4000HP являются подходящими для применений в условиях длительных уходов и требований к стабильности масштабного коэффициента. При этом имеет значение наличие температурной компенсации и низкие шумы.

5. **E Core 5000** датчики относятся к классу тактических гироскопов приемлемой точности. Датчики этой серии выгодно выделяются на фоне ВОГ низкой стоимости. Для них стабильность масштабного коэффициента составляет 0,05 %, а максимальная измеряемая скорость – 500 град/с. Преимущества этих датчиков обусловлены использованием поляризованных оптических волокон и цифровых сигнальных процессоров. Наиболее эффективной областью применения датчиков этой серии являются навигация беспилотных аппаратов и наземных подвижных объектов, а также различные коммерческие приложения.

Характеристики некоторых ВОГ производства компании KVH представлены в табл. 6 [8 – 10].

Таблица 6

Характеристики некоторых ВОГ производства компании KVH

Параметр	E Core 2000 Малые скорости	E Core 2000 Стандарт	E Core 3000 Цифровой	E Core 3000 Аналоговый	E Core 5000
Диапазон измерения, град/с	± 30	± 100	± 375	± 100	± 500
Порог чувствительности, град/с	0,014		0,216 град/ч		–
Масштабный коэффициент: аналоговый, мВ/град/с цифровой, град/с/бит	66,7 0,000915	20 0,00305	–	–	–
Температурная чувствительность масштабного коэффициента	–	–	500 промилле, 1 σ		500 промилле, 1 σ
Угловой случайный дрейф (шум), град/ч/ $\sqrt{\Gamma}$	5		4	6	5
Угловой случайный дрейф (шум), град/ $\sqrt{\Gamma}$	0,08		0,0667	0,1	0,083

Окончание табл. 6

Параметр	E Core 2000 Малые скорости, E Core 2000 Стандарт	E Core 3000 Цифровой	E Core 3000 Аналоговый	E Core 5000
Полоса пропускания, Гц	100	500	100	
Время готовности, с	1	< 5		< 5
Интерфейс				
Электропитание: напряжение постоянного тока мощность	От +9 до +18 В или от 18 до 36 В, 2 Вт (аналоговый), 3 Вт (цифровой)	+5 В ± 10% 3 Вт максимальная, 2 Вт стандарт		5 В; 3 Вт
Цифровой выход	RS232 или RS422	RS-232	± 2 В	RS-232
		3,072 мГц,	± 1 В	
Условия эксплуатации				
Рабочая температура	От -40 до +75 °С	От -40 до +75 °С		50 °С... ...85 °С
Температура хранения	От -50 до +85 °С	От -50 до +85 °С		-50 °С... ...85 °С
Удары	–	40g, 6-10 мс		90g, 11 мс
Случайная вибрация	–	От 20 до 2000 Гц, 8 g СКО		20...2000 Гц, 6 g
Среднее время безотказной работы, ч	–	55000		>55000
Массогабаритные характеристики				
Габаритные размеры, мм	112 × 108 × 43	88,9 × 58,42 × 33,02		112 × 99 × 41
Масса, г	340	270		250

Тенденции развития волоконно-оптических гироскопов. Для уменьшения размеров и стоимости инерциальных измерительных блоков на основе ВОГ целесообразно использовать многоосные ВОГ с одним общим источником [2]. В частности, может использоваться триада кольцевых интерферометров для измерения трех взаимно-перпендикулярных составляющих угловой скорости. Обычно в этом случае используется активированный эрбием волоконный источник, поскольку его большая мощность может быть распределена с наименьшими шумами. Кроме того, неполяризованность источника позволяет использовать пучок простых устройств связи.

Следующей тенденцией развития ВОГ является *мультиплексирование* [2]. Источник распределяется между несколькими интерферометрами, состоящими из чувствительной катушки и многофункциональной интегрально-оптической микросхемы. При этом сигналы возвращаются на отдельный детектор. Мультиплексирование выполняется при помощи

фазовой модуляции. Одним из возможных подходов к решению проблемы является последовательное применение модуляции к одному интерферометру, в то время как к другим интерферометрам модуляция не применяется. При втором подходе остальные интерферометры также модулируются с интервалом $\pm\pi$ рад, что значительно снижает их чувствительность.

Поскольку факторами, ограничивающими массогабаритные характеристики и стоимость, ВОГ прежде всего являются приемо-передающие устройства и дорогостоящее волокно; дальнейшее развитие ВОГ связано с созданием волокон с низкой стоимостью, низкокогерентных источников света высокой мощности и технологий высоконадежной компоновки гибридных фотонных устройств [1].

Компоновка отдельных фотонных устройств зависит от технологии прецизионной укладки волокна. Поэтому появление новых технологий укладки оптического волокна обусловило возможность интеграции нескольких фотонных устройств в единый блок. Последние достижения в области интеграции привели к возможности создания приемопередающих устройств с массогабаритными характеристиками $15\times 13\times 8$ мм. Для создания такого компактного устройства без потерь в характеристиках была разработана новая технология укладки оптического волокна с микронной точностью.

Волоконно-оптические гироскопы, предназначенные для условий эксплуатации повышенной сложности, то есть в условиях вибрации, ударов, а также широкого диапазона температур (например, от -54 до $+85$ °C), как правило, требуют повышенной надежности и длительного срока эксплуатации. Создание соответствующих датчиков требует использования интерференционных волоконно-оптических гироскопов с высокой степенью гибридной интеграции. Гибридная оптическая интеграция не только улучшает характеристики точности и живучести в сложных условиях эксплуатации, но и значительно сокращает стоимость датчиков.

Выводы. Проанализировано состояние разработки современных волоконно-оптических гироскопов. Приведены характеристики датчиков производства ближнего и дальнего зарубежья. Определены области применения современных волоконно-оптических гироскопов. Представлены основные тенденции развития датчиков исследуемого типа.

Список литературы

1. *Lefevre H. C. Fundamentals of the Interferometric Fiber-Optic Gyroscopes / H. C. Lefevre // Photonetics. – 1996. – Vol. 4. – No. 1A. – P. 20–27.*
2. *KVH, E-Core FOG – A New Spin On Fiber Optic Gyro [Электронный ресурс] // KVH. – Режим доступа: <ftp://ftp.uni-duisburg.de/Hardware/KVH/e-core.pdf>*
3. *KVH, KVH E-Core 2000 Fiber optic Gyro. Technical Manual [Электронный ресурс] // KVH. – Режим доступа: <http://www.kvh.com>*
4. *KVH, KVH E-Core 3000 Fiber optic Gyro. Technical Manual [Электронный ресурс] // KVH. – Режим доступа: <http://www.kvh.com>*
5. *KVH, KVH E-Core 5000 Fiber optic Gyro. Technical Manual [Электронный ресурс] // KVH. – Режим доступа: <http://www.kvh.com>*
6. *Logan R. Optical integration improves fiberoptic gyroscopes [Электронный ресурс] / R. Logan // LaserFocusWorld: International Resource for Technology and Applications in the Global Photonics Industry. – Режим доступа: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-41/issue-7/optoelectronics-manufacturing/optical-integration-improves-fiber-optic-gyroscopes.html>*
7. *Коркишко Ю. Н. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности / Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий и др. // Гироскопия и навигация. – 2008. – №1 – С. 71–81.*

8. Олехнович Р. О. Пути создания волоконно-оптического гироскопа повышенной точности: автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук: 05.11.01 – СПб., 2010. – 20 с.
9. Соломатин В. Технические условия на волоконный датчик вращения / В. Соломатин, В. Н. Логозинский // Физоптика. – 2009. – №3 – 20 с.
10. ОИУС-1000. Прецизионный одноосный измеритель угловой скорости (волоконно-оптический гироскоп) [Электронный ресурс] // Оптилинк: научно-производственная компания. – Режим доступа: <http://www.optolink.ru/ftpgetfile.php?id=16>

О. А. Сущенко, В. В. Пальчик

Огляд сучасного стану волоконно-оптичних датчиків кутової швидкості та тенденції їх розвитку

Виконано огляд стану розроблення волоконно-оптичних датчиків кутової швидкості ближнього та дальнього зарубіжжя. На підставі аналізу характеристик датчиків надано рекомендації щодо їх використання в аерокосмічних застосуваннях. Подано тенденції розвитку сучасних волоконно-оптичних датчиків кутової швидкості.

O. A. Sushchenko, V. V. Palchyk

Review of the Modern Status of the Fiber-Optic Angular Rate Sensors and Trends of their Development

In the paper the review of the near abroad and foreign countries fiber-optic angular rate sensors development status is carried out. Based on the sensors characteristics analysis the recommendations by usage of the sensors to be studied in the aerospace applications were given. Trends of the modern fiber-optic angular rate sensors development are represented.