

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. Управление движением мобильного робота с использованием данных визуального одометра // Робототехника и техн. кибернетика. 2013. №1. С. 22–26.
2. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. Визуальный одометр // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. С. 68–82.
3. Дишель В. Д., Ивашина Е. А., Корлякова М. О., Пилипенко А. Ю., Филимонков А. А. Подход к коррекции азимутальной ориентации системы навигации с бесплатформенным инерциальным блоком // Тр. ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2013. № 4. С. 37–45.
4. Ивашина Е. А., Корлякова М. О., Пилипенко А. Ю., Филимонков А. А. Интеграция системы технического зрения с бесплатформенным инерциальным блоком системы навигации // Тр. ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2014. № 1. С. 51–59.
5. Корлякова М. О., Пилипенко А. Ю. Нейросетевой поиск особых точек в стереопарах // Тез. докл. НТК «Техническое зрение в системах управления 2014», М., 18–20 марта 2014. С. 125–127. URL: http://tvcs2014.technicalvision.ru/docs/сборник_тезисов_ТЗСУ_2014.pdf (дата обращения 11.06.2017).
6. Научно-производственная компания ВИДЕОСКАН [Электронный ресурс]. URL: <http://videoscan.ru/> (дата обращения: 11.02.2016).
7. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: Бином. Лаб. знаний, 2006.
8. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. С. 41–163.

УДК 623.4.084.3

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП ОИУС-5000

Д-р физ.-мат. наук Ю. Н. Коркишко, д-р физ.-мат. наук В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий, канд. техн. наук В. Г. Пономарев, И. В. Морев, Д. В. Обухович, С. В. Прилуцкий, д-р физ.-мат. наук С. М. Кострицкий, канд. техн. наук И. В. Федоров, А. И. Зуев, В. К. Варнаков (ООО «НПК «Оптолинк», г. Москва)

Описан разработанный на предприятии «Оптолинк» одноосный волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) ОИУС-5000, имеющий рекордно низкий дрейф нулевого сигнала. Рассмотрены оптические и электронные блоки ОИУС-5000 и представлены его основные технические характеристики.

Введение

В НПК «Оптолинк» налажено промышленное производство волоконно-оптических гироскопов, блоков чувствительных элементов и бесплатформенных инерциальных навигационных систем на их основе с годовым выпуском 1500–2000 осей [1–5]. Изготавливаемые приборы всей номенклатуры имеют дрейф нулевого сигнала от 0,1 до 0,005 °/ч. Однако для ряда применений требуются еще более точные гироскопы. В данной статье представлены результаты разработки ВОГ ОИУС-5000 (рис. 1) с минимально возможным на сегодняшний день дрейфом нулевого сигнала.



Рис. 1. Волоконно-оптический гироскоп ОИУС-5000

Состав прибора и его функциональная схема

Прибор предназначен для использования в качестве измерителя проекции вектора угловой скорости на его ось чувствительности. Структура прибора представлена на рис. 2. Прибор содержит:

- оптический блок, в состав которого входят кольцевой волоконно-оптический контур (далее волоконный контур (ВК)), многофункциональный интегрально-оптический модуль (МИОМ), суперлюминесцентный источник оптического излучения – суперлюминесцентный диод (СЛД), фотодиод ТФД-50МР;
- плату усилителя фототока (УФТ), на которой установлен фотодиод ТФД-50МР;
- плату усилителя (ПУ) сигнала фазовой модуляции;
- плату управления излучателем (ПУИ), на которой установлен СЛД;
- блок цифровой обработки (БЦО);
- плату интерфейса (ПИ).

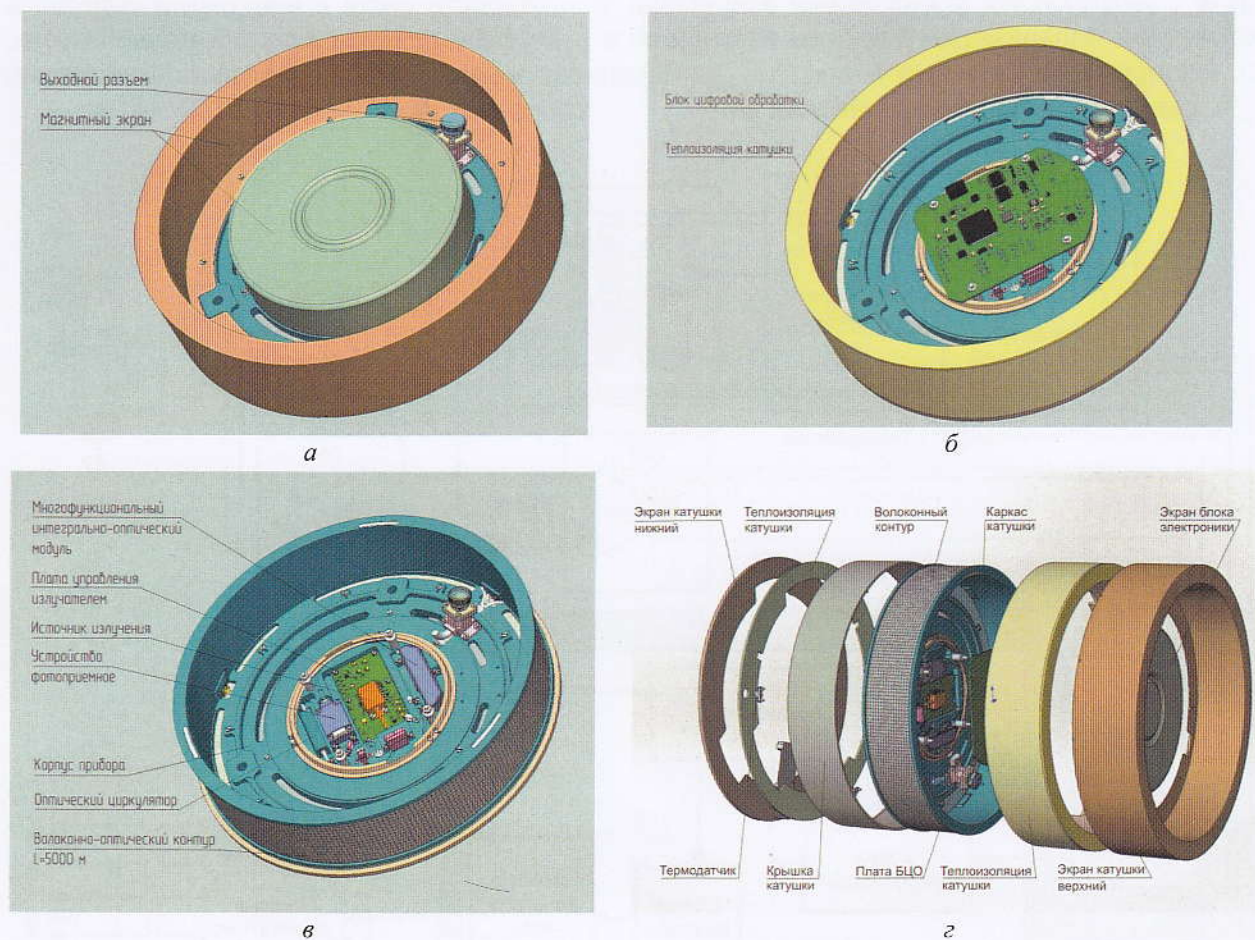


Рис. 2. Структура прибора ОИУС- 5000:

а – вид прибора с закрытым колпаком; *б* – БЦО; *в* – оптический блок; *г* – волоконная катушка

Функциональная схема прибора представлена на рис. 3.

Устройство и работа прибора

Чувствительная часть оптической схемы прибора представляет собой ВК, намотанный на цилиндрической катушке. Волоконный контур выполнен из специально изготавливаемого на предприятии радиационно стойкого, сохраняющего поляризацию световода. Длина ВК $L = 5000$ м, диаметр катушки $D = 240$ мм. Катушка с ВК помещена в цилиндрический

стакан, находящийся на несущем основании корпуса прибора. Во внутреннем объёме катушки прибора размещены УФТ с фотодиодом ТФД-50МР, ПУИ с источником излучения, МИОМ и ПУ сигнала фазовой модуляции. Фотодиод ТФД-50МР и МИОМ изготовлены с входами-выходами соответственно из многомодового и одномодового световодов собственного производства.

Оптический сигнал, в спектре которого зашифрована информация о действующей угловой скорости, с помощью УФТ преобразуется в электрический сигнал, усиливается и поступает в плату БЦО.

Известно, что максимальное отклонение нулевого сигнала ВОГ, вызываемое поляризационной невзаимностью, зависит как от параметров ВК, так и от спектральных и поляризационных характеристик излучения [6, 7]:

$$\Delta\Omega_p^{\max} \leq \frac{\lambda c p \epsilon}{DL} \sqrt{\frac{\lambda \sqrt{\ln 2}}{\pi \Delta\lambda}} h L_p,$$

где λ – центральная длина волны излучения; c – скорость света в вакууме; p – степень остаточной поляризации входного излучения; ϵ – коэффициент экстинкции поляризатора; $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения; h – коэффициент межмодовой поляризационной связи; L_p – длина поляризационных биений ВК.

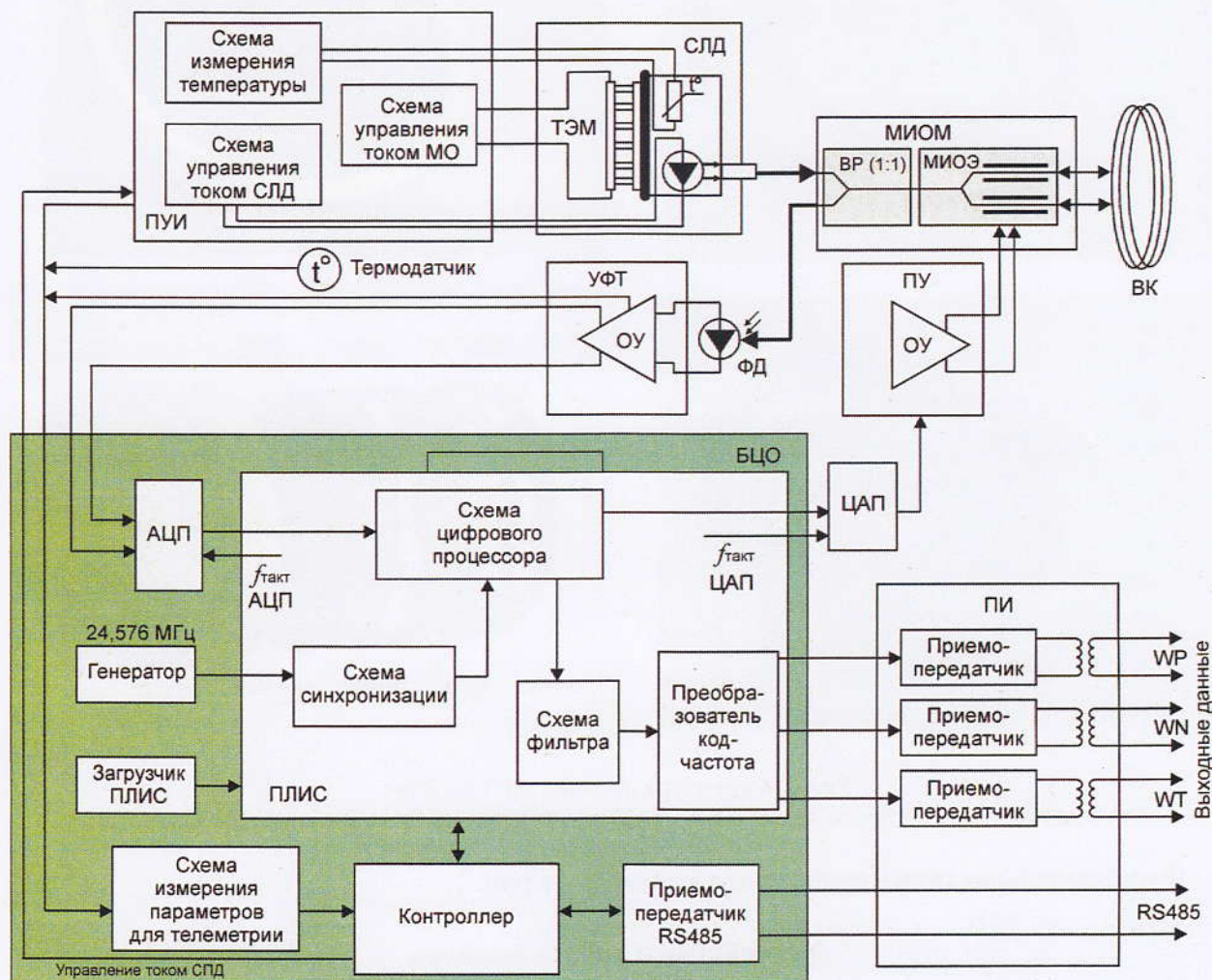


Рис. 3. Функциональная схема ВОГ ОИУС-5000:

МО – микроохладитель; ТЭМ – термоэлектрический модуль; ОУ – операционный усилитель; ФД – фотодиод; ВР – волоконный разветвитель; МИОЭ – многофункциональный интегрально-оптический элемент; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема; $f_{\text{такт}}$ – тактовая частота

Спектральная плотность мощности шума (СПМШ), получаемая в результате учета всех основных факторов при глубине вспомогательной модуляции $\pi/2$ рад, определяется выражением [8, 9]:

$$W = \frac{\sqrt{2} \cdot \lambda c}{2\pi DL} \sqrt{\frac{4kT}{R\eta^2 P^2} + \frac{e i_d}{\eta^2 P^2} + \frac{e}{\eta P} + \frac{\lambda^2}{4c\Delta\lambda}},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура прибора; R – сопротивление трансимпедансного преобразователя фотоприемного устройства; η – эффективность фотоприемника; P – поток излучения, падающего на фотоприемник; e – заряд электрона; i_d – темновой ток фотоприемника. Первый член суммы под знаком радикала определяет тепловой шум усилителя, второй – шум темнового тока, третий – дробовой шум и четвертый – избыточный шум излучателя.

Для достижения минимального избыточного шума излучателя в качестве источника излучения использовался СЛД с максимальной шириной спектра, а именно 100 нм.

Плата управления излучателем, на которой установлен СЛД, содержащий встроенный термодатчик и ТЭМ, обеспечивает с помощью ТЭМ тепловой режим излучающего кристалла СЛД в пределах $(25 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ и тем самым стабилизирует мощность и длину волны излучения СЛД.

Плата БЦО расположена с нижней стороны основания корпуса прибора. Она преобразует аналоговый сигнал от УФТ в цифровой код и далее цифровой код – в пилообразное напряжение с наклоном, пропорциональным измеряемой угловой скорости.

Плата интерфейса имеет два варианта исполнения. В зависимости от варианта может быть выбран вид выдаваемой информации об измеряемой угловой скорости:

1. Информация об измеряемой угловой скорости выдается в виде биполярного сигнала, состоящего из двух импульсов положительной и отрицательной полярности заданной длительности и заданного интервала между передними фронтами импульсов. Частота следования пары импульсов пропорциональна проекции вектора угловой скорости на измерительную ось прибора. Биполярный сигнал выдается по отдельным линиям связи для различных полярностей измеряемой угловой скорости. При вращении прибора в положительном направлении относительно измерительной оси формируется биполярный сигнал на контактах WP+, WP-. При вращении прибора в отрицательном направлении относительно измерительной оси формируется биполярный выходной сигнал на контактах WN+, WN-.

Одновременное появление импульсов по выходам WP и WN исключено.

2. Информация об измеряемой угловой скорости выдается по интерфейсу RS-485 информационными пакетами фиксированной длины. Измерение и выдача пакета производятся по внешнему синхросигналу. В варианте прибора с интерфейсом RS-485 реализована функция самоконтроля, которая позволяет оценить работоспособность ВОГ.

Внутреннее устройство прибора ОИУС-5000 и расположение электронных блоков представлено на рис. 4.

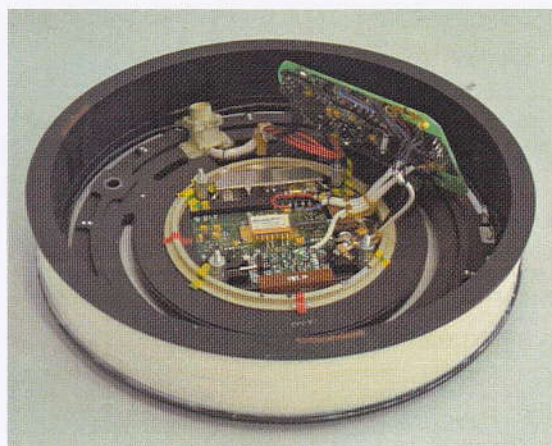


Рис. 4. Устройство прибора ОИУС-5000

Основные технические характеристики волоконно-оптического гироскопа ОИУС-5000

Прибор ОИУС-5000 имеет следующие характеристики:

Диапазон измерения, °/с	±12
Случайная составляющая (дрейф) нулевого сигнала при постоянной температуре, °/ч	0,0015 (3 σ)
Спектральная плотность мощности шума, °/√ч	$7 \cdot 10^{-5}$
Погрешность масштабного коэффициента в запуске, ppm	10
Потребляемая мощность, Вт	7
Масса, кг	1,7
Габаритные размеры, мм	∅250×45
Длина световода ВК, м	5000
Диаметр катушки ВК, мм	240

Питание прибора происходит через понижающие преобразователи напряжения с гальванической развязкой.

На рис. 5 представлена вариация Аллана для прибора ОИУС-5000 и в качестве сравнительных данных – для других известных высокоточных ВОГ.

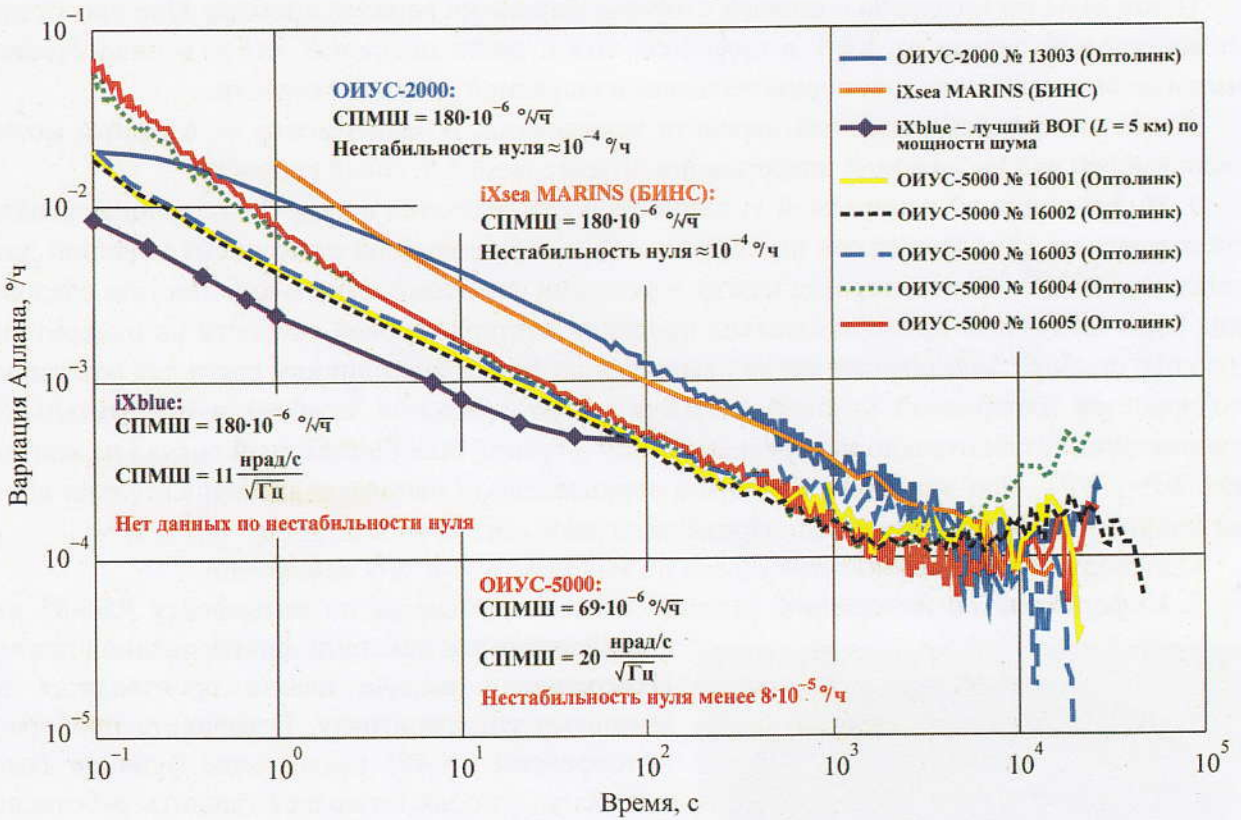
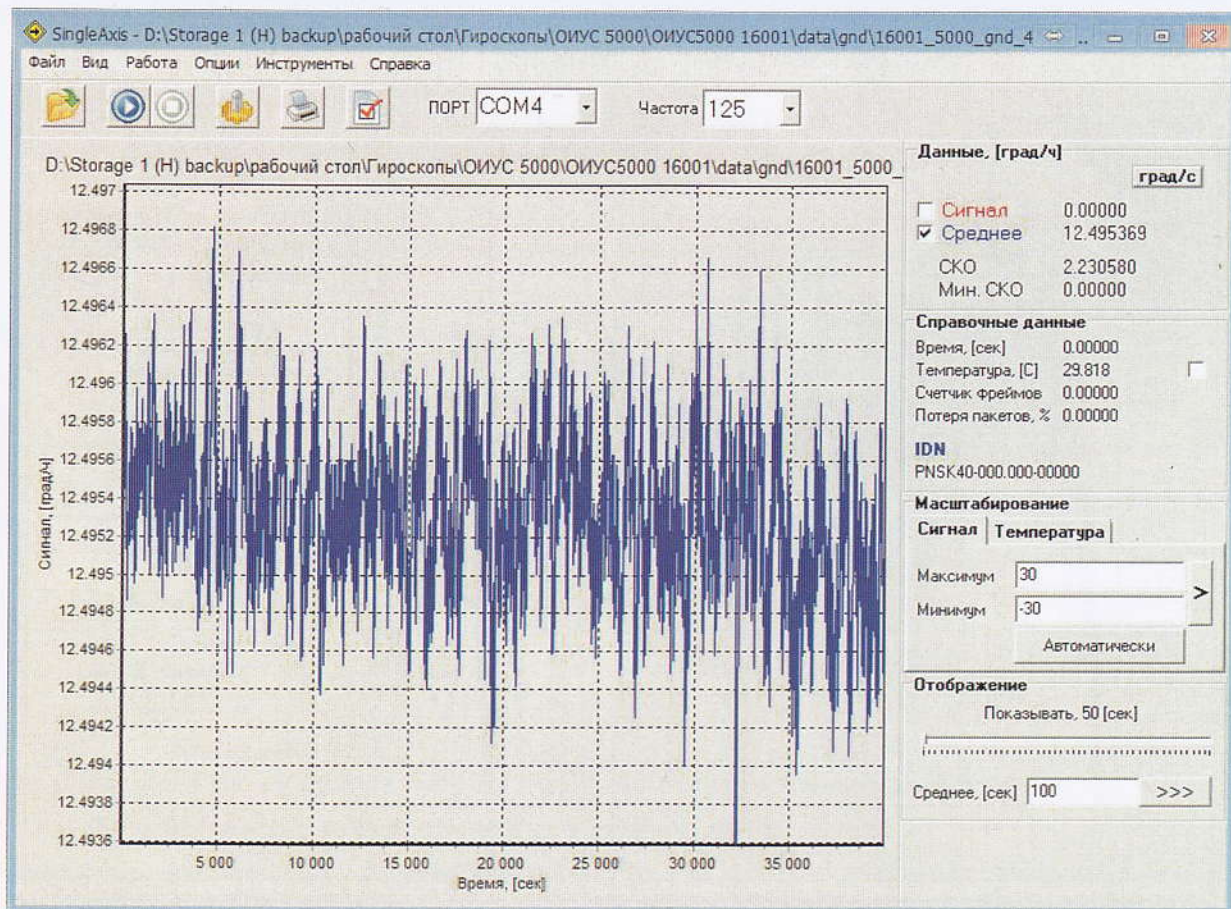


Рис. 5. Вариация Аллана для ОИУС-5000 и других известных высокоточных ВОГ

На рис. 6 и 7 представлены результаты измерений стабильности нулевого сигнала ВОГ ОИУС-5000 в одиночном запуске и от запуска к запуску соответственно.

**СЕКЦИЯ 2. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ, НАВИГАЦИИ И ТОПОПРИВЯЗКИ.
ДАТЧИКИ СИСТЕМ ОРИЕНТИРОВАНИЯ И НАВИГАЦИИ**



Расчет основных параметров

Параметры расчета

Время случайной составляющей нулевого сигнала, [сек] 100.000

Полоса прибора, [Гц] 100

Время спектр. плот. мощности шума, шумовой сост. нул. сигнала [сек] 10.000

Вертик. сост. угл. скорости земли рабочего места, [град/ч] 12.465000

Отрезок времени расчета от 0.002 до 39997.952

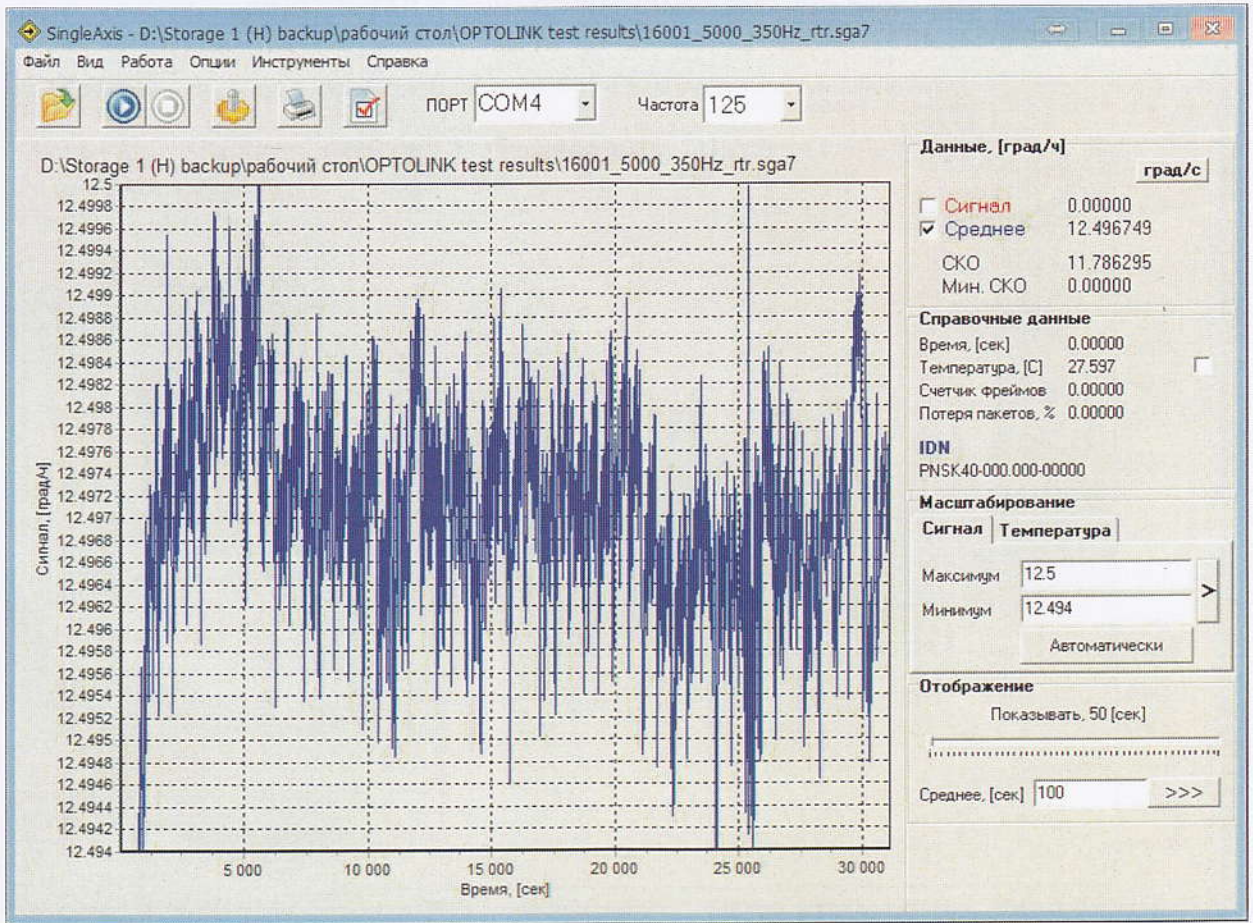
Случайная составляющая нулевого сигнала 1 сигма 3 сигма

Результаты расчета основных параметров

Наименование	Значение	Размерность
Среднее значение в запуске	12.4952928	град/ч
Случайная составляющая нулевого сигнала	0.00051295	град/ч
Систематическая составляющая нулевого сигнала	0.0302928	град/ч

Кнопки: Перерасчет, Печать, Закрыть

Рис. 6. Случайная составляющая нулевого сигнала ВОГ ОИУС-5000 в одиночном запуске (скриншот программы SingleAxis)



Расчет основных параметров

Параметры расчета

Время случайной составляющей нулевого сигнала, [сек]	100.000
Полоса прибора, [Гц]	100
Время спектр. плот. мощности шума, шумовой сост. нул. сигнала [сек]	10.000
Вертик. сост. угл. скорости земли рабочего места, [град/ч]	12.465000
Отрезок времени расчета от	5896.785 до 31102.535

Случайная составляющая нулевого сигнала 1 сигма 3 сигма

Результаты расчета основных параметров

Наименование	Значение	Размерность
Среднее значение в запуске	12.4969606	град/ч
Случайная составляющая нулевого сигнала	0.00107202	град/ч
Систематическая составляющая нулевого сигнала	0.0319606	град/ч

Перерасчет Печать Закрыть

Рис. 7. Случайная составляющая нулевого сигнала ВОГ ОИУС-5000 от запуска к запуску (включение/выключение прибора через каждые 10 мин записи) (скриншот программы SingleAxis)

**СЕКЦИЯ 2. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ, НАВИГАЦИИ И ТОПОПРИВЯЗКИ.
ДАТЧИКИ СИСТЕМ ОРИЕНТИРОВАНИЯ И НАВИГАЦИИ**

На рис. 8 и 9 представлены результаты расчета стабильности масштабного коэффициента ВОГ ОИУС-5000 в одиночном запуске и от запуска к запуску соответственно.

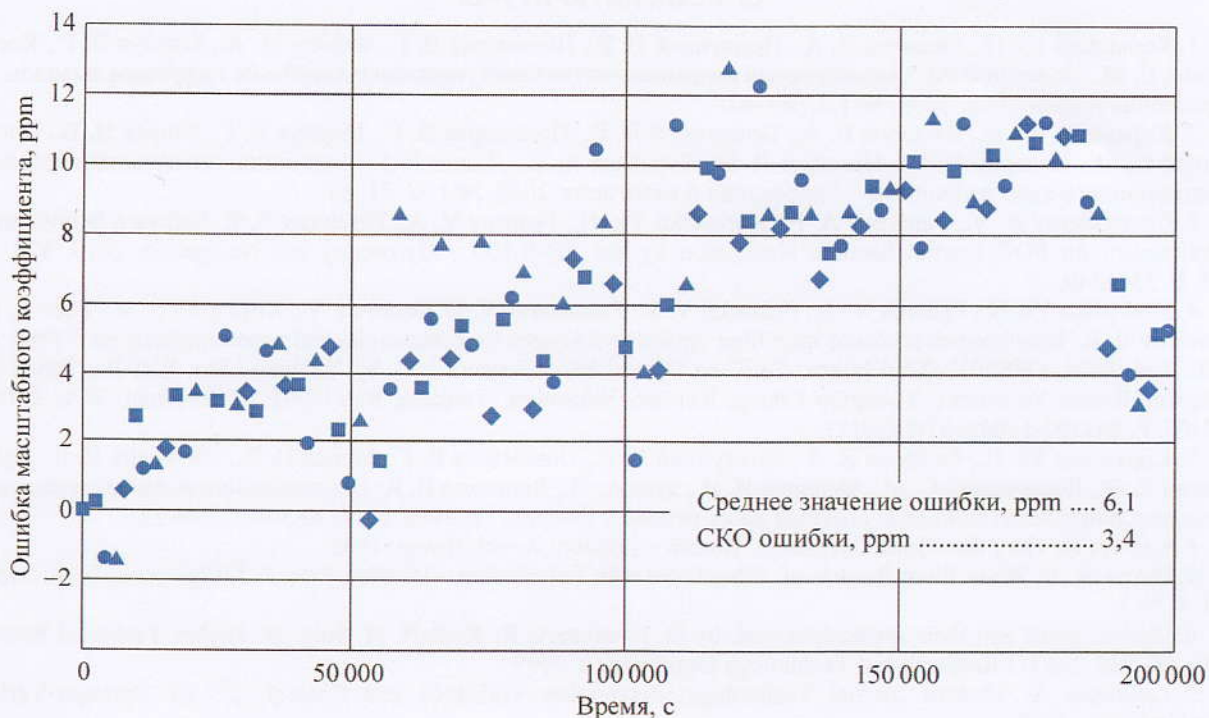


Рис. 8. Стабильность масштабного коэффициента ВОГ ОИУС-5000 во времени в одиночном запуске при различной задаваемой угловой скорости поворотного стола:
◆ – 6 °/с; ■ – 8 °/с; ● – 10 °/с; ▲ – 12 °/с

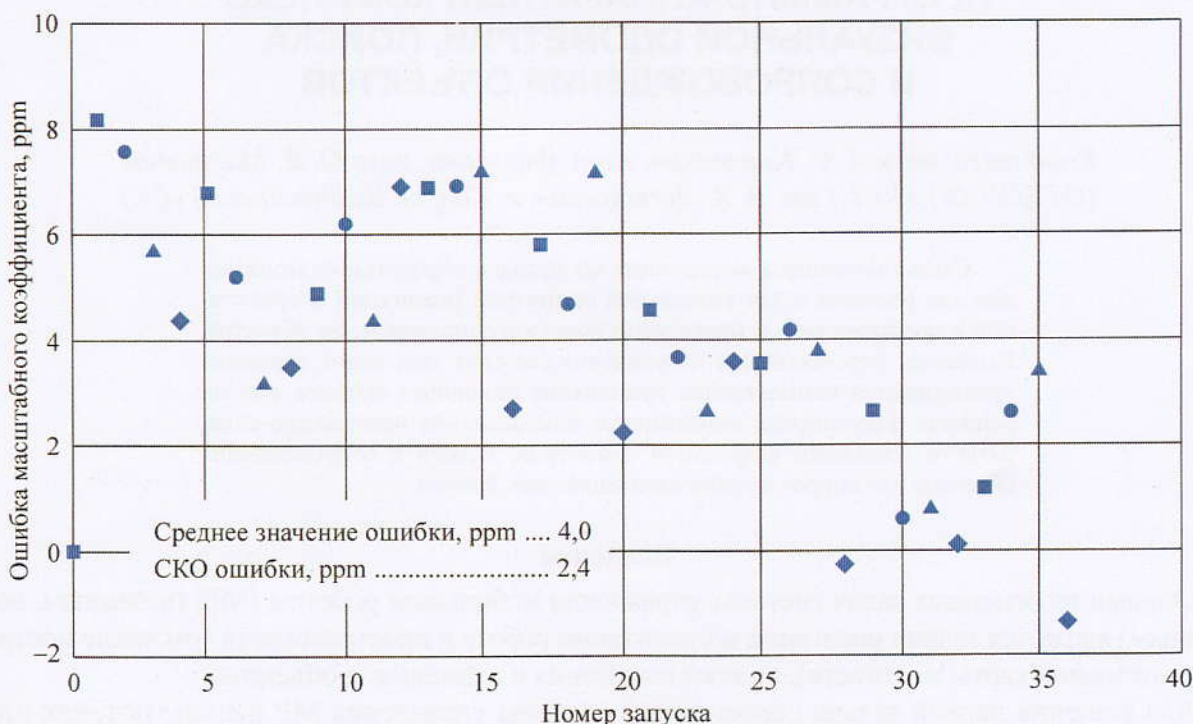


Рис. 9. Стабильность масштабного коэффициента ВОГ ОИУС-5000 от запуска к запуску при различной задаваемой угловой скорости поворотного стола:
◆ – 6 °/с; ■ – 8 °/с; ● – 10 °/с; ▲ – 12 °/с

Таким образом, ООО «НПК «Оптолинк» разработан и подготовлен для серийного производства самый прецизионный из всех известных ВОГ ОИУС-5000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 выходом // Гироскопия и навигация. 2004. № 1. С. 69–82.
2. 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.
3. Chernodarov A. V., Patrikeev A. P., Korkishko Yu. N., Fedorov V. A., Perelyaev S. E. Software Seminal Development for FOG Inertial Satellite Navigation System SINS-500 // Gyroscopy and Navigation. 2010. Vol. 1, № 4. P. 330–340.
4. Korkishko Yu. N., Fedorov V. A., Prilutskii V. E., Ponomarev V. G., Morev I. V., Kostritskii S. M., Zuev A. I., Varnakov V. K. Interferometric closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // Proc. of SPIE. Vol. 8421, OFS2012 22nd Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors / ed. by Yanbiao Liao, Wei Jin, David D. Sampson, Ryozi Yamauchi, Youngjoo Chung, Kentaro Nakamura, Yunjiang Rao (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 842107, P. 842107-1–842107-8 (2012).
5. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Морев И. В., Обухович Д. В., Прилуцкий С. В., Кострицкий С. М., Федоров И. В., Зуев А. И., Варнаков В. К. Волоконно-оптические гироскопы и инерциальные навигационные системы на их основе // Оборон. техника. 2014. № 3–4. С. 39–52.
6. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. Boston – London: Artech House, 1993.
7. Burns W. K. Phase Error Bounds of Fiber Gyro with Polarisation – Holding Fiber // J. Lightwave Tech. 1986. Vol. 4, № 1.
8. Optical gyros and their application / ed. by D. Loukianov, R. Rodloff, H. Sorg, B. Stieler: Technical Report RTO-AG-339, NATO Research and Technology Organisation, 1999.
9. Lawrence A. Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance and Control. 2nd ed. Springer-Verlag New York Inc., 1998.

УДК 004.896:535.8

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ВИЗУАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ, ПОИСКА И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

*Канд техн. наук А. С. Карпенков, канд. физ.-мат. наук О. В. Мартынов
(ФГБОУ ВО «КГТА им. В. А. Дегтярева», г. Ковров Владимирской обл.)*

Статья посвящена использованию методов обработки видеосигналов для решения задач визуальной одометрии (навигации и ориентации в пространстве), а также задач поиска и сопровождения объектов. Выделены перспективные направления решения этих задач, показаны преимущества комплексного применения различных методов при их решении. Рассмотрена возможность использования программно-аппаратного комплекса визуальной одометрии, поиска и сопровождения объектов для корректировки навигационных данных.

Введение

Одними из основных задач системы управления мобильным роботом (МР) (наземным, воздушным) являются задачи навигации и ориентации робота в пространстве (в том числе построение локальной карты местности), а также выделения и слежения за объектом.

Для решения первой задачи современные системы управления МР используют, как правило, комплексирование различных навигационных систем: бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), спутниковой навигационной системы, одометрической наземной навигационной аппаратуры. Как правило, эталонной системой выступает