

БЕСПЛАТФОРМЕННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Ю. Н. Коркишко¹, В. А. Федоров², В. Е. Прилуцкий³, В. Г. Пономарев⁴, И. В. Морев⁵,
С.Ф. Скрипников⁶, М.И.Хмелевская⁷, А.С.Буравлев⁸, С.М.Кострицкий⁹, А.И.Зуев¹⁰, В.К.Варнаков¹¹

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

Аннотация

Ключевые слова: бесплатформенные инерциальные навигационные системы, волоконно-оптические гироскопы

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) стали основой навигационных комплексов современных подвижных объектов. В настоящее время в системах инерциальной навигации начинают широко применяться БИНС на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи. В работе представлены разработки бесплатформенных инерциальных навигационных систем БИНС-500К, БИНС-500М и БИНС-501 компании НПК «Оптолинк» на основе ВОГ собственного изготовления и результаты их испытаний в различных применениях.

Введение

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) стали основой навигационных комплексов современных подвижных объектов [1]. Это обусловлено тем, что они дают полную информацию о навигационных параметрах движения – углах курса, тангажа (дифферента), крена, ускорения, скорости движения и координатах объекта. При этом они почти автономны, так как требуют минимум внешней информации. Благодаря возможности определения углового положения объекта с высокой точностью в любом диапазоне углов и с высокой частотой выдачи информации, БИНС к настоящему времени не имеют альтернативы. В настоящее время в системах инерциальной навигации начинают широко применяться БИНС на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи [2].

Компания «ООО НПК «Оптолинк» является ведущим российским производителем волоконно-оптических гироскопов и БИНС на их основе [3-14]. В данной работе представлены разработки бесплатформенных инерциальных навигационных систем БИНС-500К, БИНС-500М и БИНС-501 компании НПК «Оптолинк» на основе волоконно-оптических гироскопов собственного изготовления и результаты их испытаний в различных применениях.

Волоконно-оптические гироскопы

Все ВОГ компании НПК «Оптолинк» изготавливаются в так называемой минимальной конфигурации, с цифровой обработкой сигналов (ЦОС). Минимальная конфигурация обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре.

Структурные схемы одноосных (ОИУС) и трехосных (ТИУС) ВОГ с ЦОС представлены на рис. 1 и 2, соответственно. В состав приборов входит один источник света с центральной длиной волны излучения 1550 нм, один или три фотодетектора; один или два разветвителя (1:1 и 1:2) для деления света, один или три интерферометра, чувствительных к ортогональным угловым скоростям, и блок электроники. Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента

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 Ведущий инженер.

⁸ Ведущий инженер.

⁹ Д.ф.-м.н., доцент, технический директор Зеленоградского отделения.

¹⁰ Директор Арзамасского отделения.

¹¹ Технический директор Арзамасского отделения.

(МИОЭ) и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК) длиной 200, 500, 1000 или 2000 м собственного производства. МИОЭ представляет собой интегрально-оптическую схему, сформированную на пластине кристалла ниобата лития [3]. В ТИУС-500 (и БЧЭ-500) используется один излучатель на три канала. Использование трех УФП позволяет вести обработку сигналов одновременно с трех каналов независимыми блоками цифровой обработки (БЦО). Каждый из БЦО формирует напряжения для получения пилообразной (ступенчатой) компенсирующей модуляции света для компенсации разности фаз Саньяка и для внесения постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами на $\pi/2$ рад с помощью вспомогательной модуляции (ВМ). Тем самым обеспечивается непрерывная работа каждого из каналов в режиме замкнутого контура [4-8, 12-14].

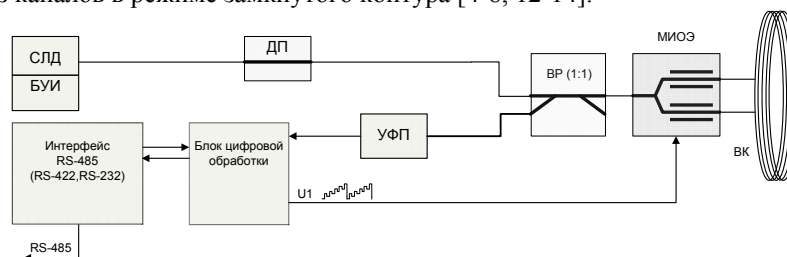


Рис. 1. Структурная схема ОИУС с ЦОС:

СЛД – суперлюминесцентный диод, БУИ – блок управления излучателем, ВР – волоконный разветвитель, ВК – волоконный контур, МИОЭ – многофункциональный интегральный оптический элемент, УФП – устройство фотоприемное, ДП – деполаризатор, RS-485 – последовательный интерфейс

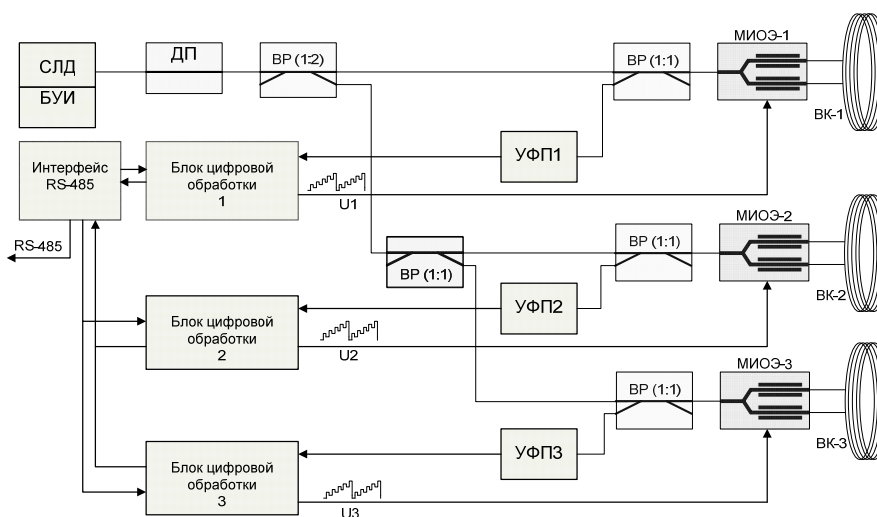


Рис. 2. Структурная схема ТИУС-500

В настоящее время компанией НПК «Оптолинк» разработаны и серийно выпускаются семейство одноосных ВОГ ОИУС-2000, ОИУС-1000, ОИУС-501 и ОИУС-200, отличающихся длиной и диаметром волоконного контура, а также трехосные ВОГ ТИУС-500 и блоки чувствительных элементов (БЧЭ) БЧЭ-500 и БЧЭ-501[4-8, 12-14]. Точностные и эксплуатационные параметры приборов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Точностные и эксплуатационные параметры волоконно-оптических гироскопов, разработанных и серийно выпускаемых компанией НПК «Оптолинк»

Характеристики	ОИУС-2000 Одноосный	ОИУС-1000 Одноосный	ОИУС-501 Одноосный	ТИУС-500 Трехосный	ОИУС-200 Одноосный	ВОБИС Трехосный (космический)
Диапазон измеряемых угловых скоростей, %/с	± 40	± 90	± 250	± 300	± 800	± 30
Смещение нуля при фиксированной температуре, %/с	0.005	0.01	0.03	0.1	0.2	0.03

Погрешность масштабного коэффициента, ppm	100	200	500	700	1000	500
Полоса пропускания, Гц	50	100	300	300	400	100
Спектральная плотность мощности шума, град/√ч	0.0003	0.0005	0.003	0.01	0.02	0.001
Масса прибора, кг	1.1	0.8	0.35	1.2	0.22	2.6
Габаритные размеры, мм	Ø 250×80	Ø150×80	Ø100×30	110×110×90	Ø70×28	172×176×110
Выходной сигнал	RS485/RS422					

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы БИНС-500 (БИНС-500К, БИНС-500М) и БИНС-501 предназначены для формирования и выдачи потребителям пилотажно-навигационной информации, как в автономном (инерциальном) режиме, так и в режиме интеграции со спутниковым приемником.

Системы БИНС-500К и БИНС-500М построены на базе блока чувствительных элементов (БЧЭ) БЧЭ-500, включающего трехосный волоконно-оптический измеритель угловой скорости ТИУС500 производства компании «Оптолинк» и три установленных ортогонально акселерометра сторонних изготовителей (АТ-1104, INN-203 или других по выбору заказчика). Выходная информация выдается в цифровом виде по каналу RS-422 (возможно по RS-485, MIL-STD-1553B и других по выбору заказчика). Управление работой ВОГ (БЧЭ) (управление режимами работы СЛД, обработкой сигналов с фотодетекторов, управление фазовыми модуляторами) осуществляется блоком сервисной электроники ВОГ (БЧЭ). Аналоговые сигналы, пропорциональные ускорениям по ортогональным осям, с трех акселерометров поступают на три канала 24 разрядного аналогово-цифрового преобразователя. На 4 вход АЦП поступает информация с температурного датчика. Вычислитель интерфейсного устройства обрабатывает информацию от всех датчиков угловой скорости, ускорения, температуры, и выдает ее в последовательный канал обмена с вычислителем. Вычислитель системы решает задачи автономной выставки, ориентации и навигации. Вычислитель обменивается с внешним устройством по последовательному каналу - выдает потребителю информацию об угловом положении, координатах, скоростях объекта и принимает от потребителя начальные данные.

Спутниковый приемник (1К-161) выдает по последовательному каналу в вычислитель корректирующую информацию о координатах и скоростях при наличии видимых спутников ГЛОНАСС или/и НАВСТАР. Вычислитель системы корректирует инерциальную систему при наличии достоверной информации от СНС. При отсутствии информации СНС, система выдает потребителю автономную инерциальную информацию [9-11].

Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-500К

Внешний вид и внутренняя структура прибора БИНС-500К показаны на рис. 3.

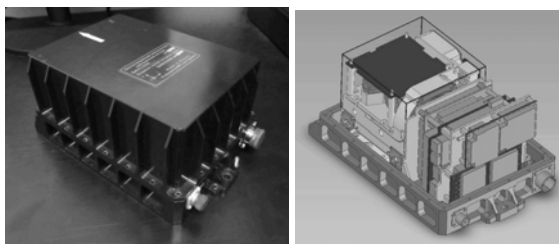


Рис. 3. Внешний вид и внутренняя структура БИНС-500К

Циклограмма работы БИНС-500К включает следующие этапы:

- грубая начальная выставка базовой навигационной системы БИНС;
- точная начальная выставка базовой навигационной системы БИНС;
- навигационный режим базовой системы БИНС.

На этапе грубой начальной выставки системы БИНС-500К (реализована выставка в статических условиях) выполняется приближенное определение угловой ориентации блока инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ) по выходным сигналам ЧЭ.

На этапе точной начальной выставки системы БИНС оцениваются ошибки угловой ориентации блока инерциальных ЧЭ (БЧЭ), а также остаточные дрейфы ЧЭ и параметры их динамических моделей. Данная задача решается методом аналитического гирокомпасирования с применением математического аппарата калмановской фильтрации.

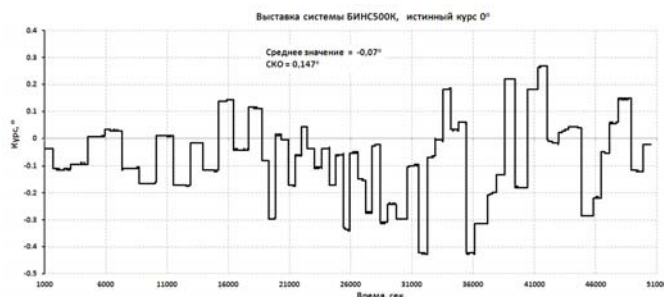


Рис. 4. Стабильность начальной выставки прибора БИНС-500К от запуска к запуску, период перезапуска (включения/ выключения) 10 мин

Оценивание и компенсация ошибок системы БИНС в навигационном режиме выполняется по позиционным и скоростным инерциально-спутниковым наблюдениям.

В настоящее время в компании НПК «Оптолинк» организовано серийное производство БИНС-500К - потребителям поставлено более 100 систем БИНС-500К для различных применений: в наземной, авиационной (самолеты, вертолеты, БПЛА), подземной (газо- и нефтепроводной), подводной навигации, в радио - и космической связи.

Получены результаты испытаний серийно изготавливаемых приборов БИНС-500К в статических и динамических условиях в широком диапазоне внешних воздействий – подтверждены специфицируемые точностные характеристики – точность определения курса (гирокомпасирования) $<0,3^\circ$ (рис. 4), погрешность определения координат в инерциальном режиме <14 км/ч).

Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-501

В 2011 г. в компании НПК «Оптолинк» закончена разработка и начато серийное производство бесплатформенной инерциальной навигационной системы БИНС-501 (рис. 5), построенной на базе БЧЭ-501, включающего три одноосных волоконно-оптических измерителя угловой скорости ОИУС-501 производства компании «Оптолинк» и три установленных ортогонально акселерометра сторонних изготовителей.

БИНС-501 предназначены для наземного и воздушного применений (реализована выставка в статических условиях) и показали улучшенные по сравнению с БИНС-500К точностные характеристики- точность определения курса (гирокомпасирования) $<0,1^\circ$ (рис. 6), погрешность определения координат в инерциальном режиме – 8 км/ч и повышенную температурную стабильность.



Рис. 5. Внешний вид прибора БИНС-501

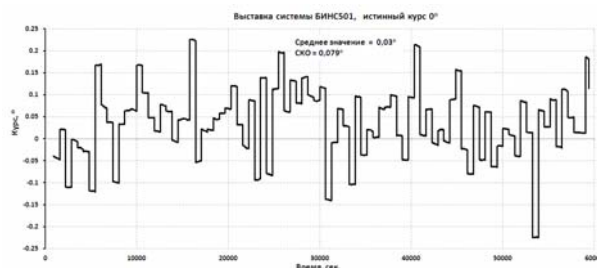


Рис. 6. Стабильность начальной выставки прибора БИНС-501 от запуска к запуску, период перезапуска (включения/ выключения) 10 мин

Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-500М

Для морских применений с возможностью начальной выставки в динамических условиях (условиях качки и движения), в 2012 г. в компании НПК «Оптолинк» была закончена разработка морской бесплатформенной инерциальной навигационной системы БИНС-500М. Система комплексирована с датчиками внешней информации морского применения (СНС, лаг, и т.д.). БИНС-500М построена на базе блока чувствительных элементов БЧЭ-500 и предназначена для формирования и выдачи потребителям навигационной информации, как в автономном режиме, так и в режиме коррекции от приемника GPS/ГЛОНАСС и лага.

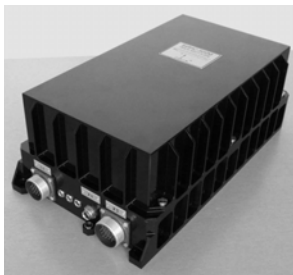


Рис. 7. Внешний вид БИНС-500М

Информация потребителю выдается в цифровом виде по интерфейсу RS-422 (возможно по RS-232), MIL-STD-1553B и Ethernet. Кроме того, с частотой 10 Гц идет обмен информацией с пультом штурмана. Пульт штурмана отображает основную навигационную информацию и позволяет настраивать и регулировать прибор. Прибор также имеет индикаторы для визуального контроля его состояния.

Внешний вид и общая схема прибора БИНС-500М показаны на рис. 7 и 8.

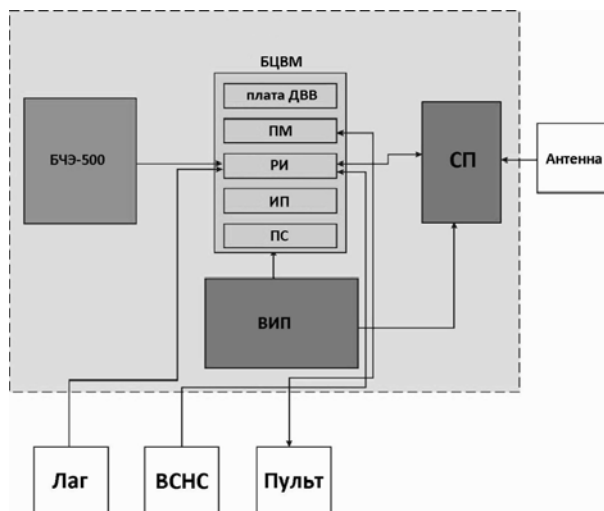


Рис. 8. Общая схема прибора БИНС-500М:

БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина, плата ДВВ – плата дискретного ввода-вывода, ПМ – процессорный модуль, РИ – расширитель интерфейса, ИП – интерфейсная плата, ПС – плата согласования, ВИП – вторичный источник питания, СП – спутниковый приемник, ВСНС – внешняя спутниковая навигационная система

Проведены испытания опытных приборов морской бесплатформенной инерциальной навигационной системы БИНС-500М на автомобиле, поворотном стенде, а также на судах.

Задачей испытаний была отработка бортового программного обеспечения и исследование точностных характеристик прибора на этапе начальной выставки и в навигационном режиме. Проверялись различные варианты построения алгоритмов прибора.

Получены результаты испытаний БИНС-500М для автомобильных испытаний погрешности выработки координат и курса; для стендовых испытаний результаты выставки прибора на качке, а также точности выработки углов качки; на судовых испытаниях погрешности выработки координат, скорости и курса, а также выставки прибора на реальной качке и на ходу. Проверялись также работоспособность выработки углов качки и вертикальных перемещений. Приведенные погрешности прибора определялись как при движении судна постоянным курсом, так и при его маневрах.

На стендовых испытаниях двухосная качка имитировалась с помощью двухосного поворотного стенда (рис. 11). Графики углов бортовой и килевой качки приведены на рис. 9, а. Графики углов бортовой и килевой качки в режиме начальной выставки приведены на рис. 9, б, а угол курса – на рис. 10. Из них видна работоспособность прибора на качке. Амплитуда и период углов равны заданным значениям с точностью: килевая качка – период 10 с (10.00299 с, ошибка ~3 мс), амплитуда – 7° (6.9918°, ошибка ~0,5'), бортовая качка – период 6.6666 с (6.6687 с, ошибка ~2 мс), амплитуда – 10° (10,015°, ошибка 0,6'÷1,2').

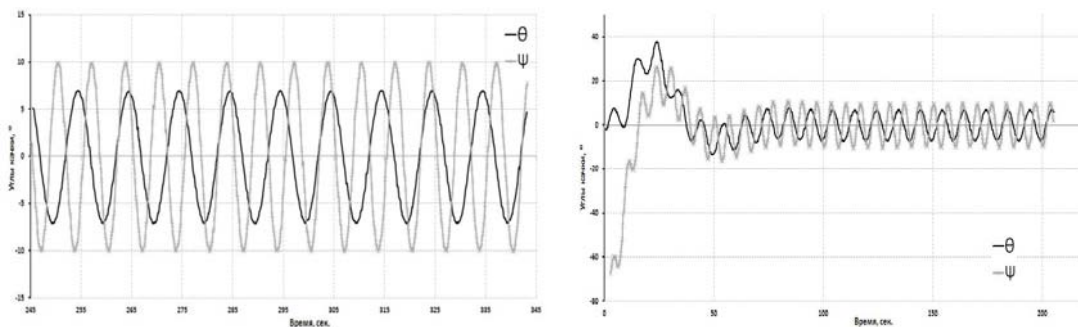


Рис. 9. Углы бортовой (ψ) и килевой (θ) качки при двухосной качке на поворотном стенде (*a* - левый) и при выставке на двухосной качке (*b* - правый)

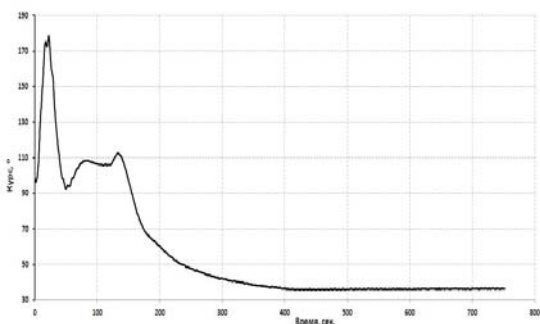


Рис. 10. Угол курса при выставке на двухосной качке

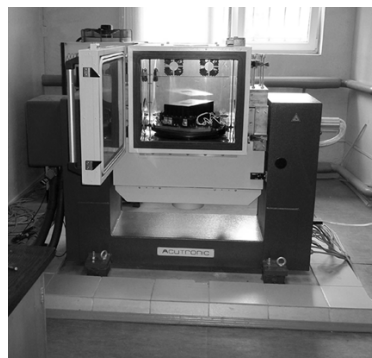


Рис. 11. Испытания БИНС-500М на двухосном поворотном стенде

Проведены испытания для проверки работоспособности и определения точностных характеристик прибора БИНС-500М на качке при движении по акватории открытой Ладоги на катере «Акустик» (водоизмещение 18 т, испытательная база Карельского филиала ОАО «Концерн ЦНИИ «Океанприбор»), а также испытания на буксире РБ-394 проекта 90600 (водоизмещение 304 т.) на Ленинградском судостроительном заводе «Пелла» (г. Отрадное Ленинградской области).

Траектория движения корабля была рассчитана так, чтобы включить в себя:

1. Выставка прибора у пирса на швартовах 15 мин. Включение записи данных.
2. Выход в открытую Ладогу 40÷60 мин.
3. Движение галсами по 8 основным румбам с постоянной скоростью и курсом в течение не менее 20 мин на каждом курсе 200 мин.
4. Маневрирование корабля, включающее в себя как минимум три полные циркуляции в обе стороны через интервалы в 5 мин, участки набора и потери скорости корабля на прямом курсе 60 мин.
5. Перезапуск ПО прибора на качке при отсутствии движения 40 мин.
6. Перезапуск ПО прибора на качке при движении постоянным курсом с постоянной скоростью 40 мин.
7. Возврат корабля к пирсу 40÷60 мин.

Точностные характеристики по скорости и координатам при корабельных испытаниях определялись путем сравнения данных, выработанных прибором и полученных со встроенного приемника GPS/ГЛОНАСС 1К-161-42 производства РИРВ. На корабле прибор приблизительно устанавливался в диаметральной плоскости корабля (ДП). Коррекция и демпфирование осуществлялись также по данным приемника GPS/ГЛОНАСС 1К-161-42 производства РИРВ. Точности выработки скорости и координат определялись сравнением со спутниковыми данными. Точность выработки курса определялась по путевому углу. Данные с прибора и СНС записывались на технологическом компьютере в один файл. Под данными СНС понимаются координаты места, скорость и путевой угол.

Траектория приведена на рис. 12, а график курса, путевого угла и северной скорости при движении по циркуляциям на испытаниях на рис. 13. Начальная выставка была проведена на ходу корабля. Общая длительность испытаний – 8 ч. Средняя скорость корабля – около 10 уз. Точность выработки координат (отклонение данных БИНС от данных СНС) в случае использования скорости от встроенного приемника GPS/Глонасс 1К-161-42 производства РИРВ составила 50/100 м по широте/долготе за 2÷5 ч.

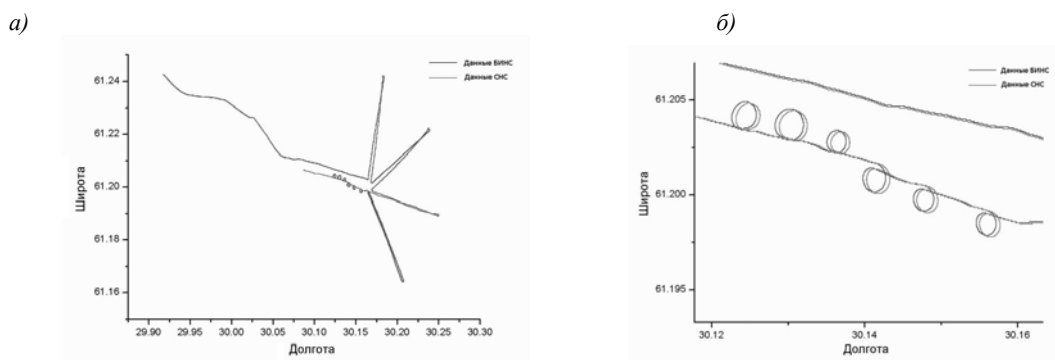


Рис. 12. Траектория движения корабля на испытаниях (а) и по циркуляциям (б)

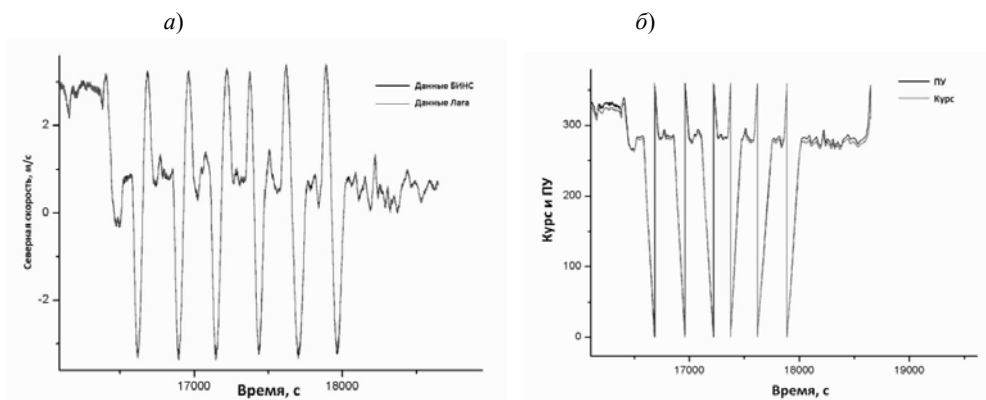


Рис. 13. График курса и путевого угла (а) и северной скорости (б) при движении по циркуляциям на испытаниях

Характеристики БИНС, выпускаемых компанией НПК «Оптолинк», сведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики бесплатформенных инерциальных навигационных, разработанных и выпускаемых компанией НПК «Оптолинк»

Характеристики	БИНС500К Для наземной и воздушной навигации (выставка в статических условиях)	БИНС500М Для морской навигации (выставка в динамических условиях (качка))	БИНС-501 Для наземной и воздушной навигации (выставка в статических условиях)
Инерциальный режим:			
• Погрешность определения координат	20 км/ч	8 км/ч	4 км/ч
• Погрешность определения скорости	14 км/ч	1.5 м/с	1 м/с
• Точность определения курса	0.5 sec(lat)°	0.4·sec(lat)°	0.1·sec(lat)°
• Точность определения крена и тангажа	0.1°	0.1°	0.05°
Комбинированный режим (GPS-GLONASS/SINS):			
• Погрешность определения координат, м	20	20	20
• Погрешность определения скорости	0.1 м/с	0.1 м/с	0.1 м/с
Время готовности, мин	10	5-15	10
Дрейф нулевого сигнала гироскопов (1σ)	< 0.1 °/ч	< 0.1 °/ч	< 0.03 °/ч
Дрейф акселерометров (1σ), g	< 5·10 ⁻⁴	< 5·10 ⁻⁴	< 1·10 ⁻⁴
Интерфейс	MIL-STD-1553B, RS-422/485	MIL-STD-1553B, RS-422/485	MIL-STD-1553B, RS-422/485
Питание, В, пост. ток	27	27	27
Потребляемая мощность, Вт	14	20	20

Размер, мм	240×160×110	343×185×120	286×163×124
Масса, кг	3.4	6.4	4.8
Условия применения:			
• угловые скорости, °/с	<300	<300	<250
• линейные ускорения, g	до 10	до 10	до 10
• вибрации, Гц	до 2000	до 2000	до 2000
• диапазон температур, С	-40 до +60	-40 до +60	-40 до +60

Заключение

Таким образом, компанией НПК «Оптолинк» разработан и серийно производится ряд бесплатформенных инерциальных навигационных систем на основе волоконно-оптических гироскопов инерциального класса точности, имеющих широкие области применения для воздушных, наземных, подземных, надводных и подводных приложений.

Литература

1. **Titterton D., Weston J.**, Strapdown Inertial Navigation Technology, Institution of Engineering and Technology, 2005.
2. **Lefevre H.**, The Fiber -Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
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. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Плотноков П.К., Михеев А.В., Наумов С.Г.** Исследование работы БИНС в условиях высоких широт с учетом погрешностей реальных датчиков // Доклады XVI Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам, 25-27 мая 2009, с. 57-60.
10. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Патрикеев А.П., Чернодаров А.В., Матюшин В.А., Переляев С.Е.** Объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей и её реализация в бесплатформенной инерциальной навигационной системе БИНС-1000 на волоконно-оптических гироскопах // Доклады XVI Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам, 25-27 мая 2009, с. 21-30.
11. **A.V.Chernodarov, A.P.Patrikeev, Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.E. Perelyaev.** Software Seminalural Development for FOG Inertial Satellite Navigation System SINS-500 // Gyroscopy and Navigation, 2010, Vol. 1, No. 4, pp. 330–340.
12. **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).
13. **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.
14. **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), 842107-1–842107-8 (2012).