

И. К. МЕШКОВСКИЙ, В. Е. СТРИГАЛЕВ, Г. Б. ДЕЙНЕКА, В. Г. ПЕШЕХОНОВ,
Д. В. ВОЛЫНСКИЙ, А. А. УНТИЛОВ

ТРЕХОСНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Представлены результаты разработки и испытаний волоконно-оптического гироскопа класса точности 0,01 град/ч, разработанного в «ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики. Рассмотрены вопросы точности гироскопа, стабильности выходной характеристики, компенсации дрейфа, борьбы с зоной нечувствительности и влиянием магнитного поля.

Введение

Общим направлением развития навигационной техники является снижение массогабаритных характеристик при сохранении или улучшении точности и уменьшении стоимости. Это относительно новое направление в гироскопии, которое тем не менее активно развивается. Известно, что волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) дешевле других типов гироскопов при сравнимой точности. При этом существуют и востребованы на рынке гироскопы с широким диапазоном характеристик точности – от 10,0 до 0,001 град/ч. По сравнению с традиционными механическими гироскопами ВОГ не имеют в своем составе движущихся частей, что обеспечивает большую надежность. В отличие от лазерных гироскопов ВОГ конструктивно проще и не требуют вывода из зоны захвата и активной системы стабилизации параметров контура. ВОГ открытого типа не имеют зоны нечувствительности, а в ВОГ замкнутого типа она может быть устранена без применения виброподвеса. Бурное развитие телекоммуникационных волоконно-оптических технологий позволяет рассчитывать на большой потенциал повышения точности. ВОГ имеют свои недостатки, на борьбу с которыми и направлены основные усилия разработчиков таких гироскопов. Перспективность применения ВОГ для систем управления и навигации движущимися объектами различного рода (наземный транспорт, суда, самолеты и т.п.) нам представляется очевидной.

Мешковский Игорь Касьянович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУИТМО).

Стригалева Владимир Евгеньевич. Кандидат физико-математических наук, профессор кафедры СПбГУИТМО.

Дейнека Геннадий Борисович. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры СПбГУИТМО.

Пешехонов Владимир Григорьевич. Академик РАН, генеральный директор ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Президент Академии навигации и управления движением.

Волынский Денис Валерьевич. Начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Унтилов Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, заместитель начальника отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

В России лидером по производству ВОГ класса точности 10,0-0,1 град/ч является ООО «Физоптика» [1], продукция которого по стоимости и эксплуатационным характеристикам не уступает и даже превосходит зарубежные аналоги. Существенное отставание от зарубежного уровня – ВОГ навигационного класса точности 0,01 – 0,001 град/ч.

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в течение 2000-2005 гг. разработало и в настоящее время поставляет заказчикам бесплатформенные системы ориентации и навигации, построенные на базе ВОГ фирмы «Физоптика», в том числе гирогоризонткомпасы для кораблей и наземного транспорта [2-4]. Используя ВОГ класса точности 1,0 град/ч, за счет применения автокомпенсации ошибок ВОГ вращением удалось достичь точности курсоуказания 0,4-0,2 град/cos L (Latitude), что эквивалентно 0,1-0,05 град/ч. Необходимость дальнейшего повышения точности для создания морских бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и отсутствие на рынке таких ВОГ потребовали проведения собственных работ по созданию высокоточного ВОГ.

В США, Франции, Германии, Китае уже несколько лет серийно производятся системы ориентации и навигации различного назначения, использующие высокоточные ВОГ [5–9]. Наиболее известными производителями являются фирмы Northrop Grumman, Honeywell, Ixsea. Однако в России производство таких ВОГ еще не вышло на стадию серийного производства. Разработку ВОГ класса точности 0,01 град/ч ведут Пермская научно производственная приборостроительная компания [10-12] и компания «Оптолинк» (г. Зеленоград Московской обл.) [13, 14]. Обе разработки находятся в стадии завершения.

Принцип построения и основные узлы ВОГ

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» ведет совместную разработку ВОГ с Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики (СПбГУИТМО) с 2005 года. С самого начала было принято решение о разработке ВОГ класса 0,01 град/ч (рис. 1).

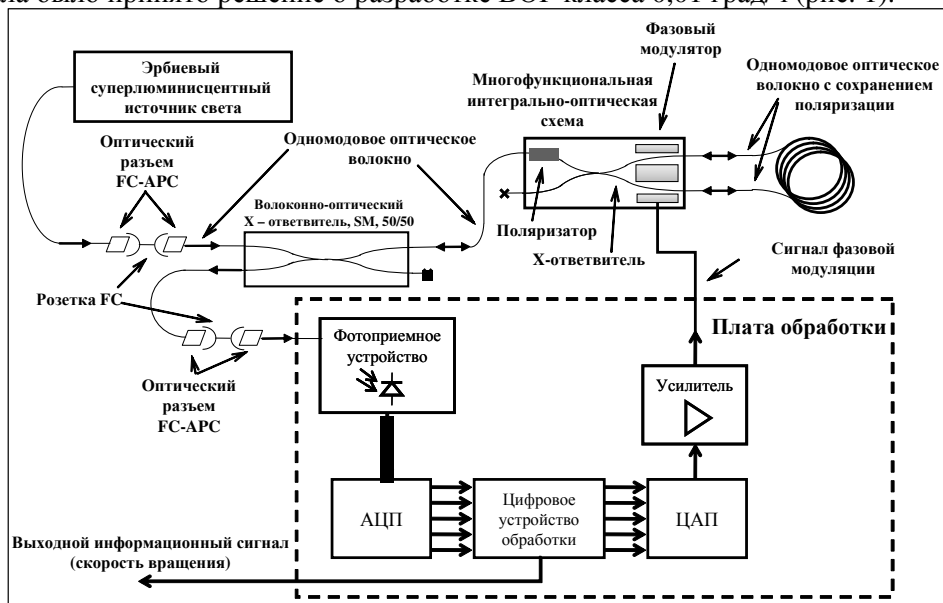


Рис. 1. Схема построения ВОГ замкнутого типа

Такое решение было обусловлено, с одной стороны, отсутствием подобных отечественных гироскопов, а с другой – наличием в производстве систем низкой точности на ВОГ фирмы «Физоптика».

Поставленная задача определила целесообразность разработки ВОГ в виде единой системы с тремя осями чувствительности, общим источником света и размещением электроники отдельно от волоконно-оптических интерферометров. Такой принцип построения ВОГ и БИНС на его основе достаточно распространен [2, 3]. Принцип действия ВОГ основан на использовании вихревого эффекта Саньяка. Для получения высокой линейности выходной характеристики и достижения требуемой точности ВОГ построен по замкнутой схеме (см. рис. 1).

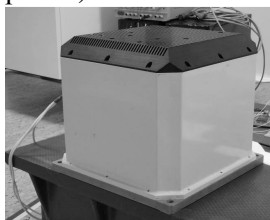


Рис. 2. Опытный образец БИМ-3

На основе экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены опытные образцы трехосного гироскопа ВОГ-3 и бесплатформенный инерциальный модуль БИМ-3 на его основе (рис. 2). Результаты первых испытаний БИМ-3 и их сравнение с характеристиками инерциального модуля IMU-120 фирмы IXSEA изложены в работе [15].

В целях обеспечения производства ВОГ в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» оборудованы «чистые» помещения площадью около 200 м², в которых установлено оборудование по сборке, настройке и испытаниям ВОГ.

Разработанный ВОГ имеет ряд существенных отличий, касающихся основных элементов конструкции, которыми являются:

- эрбиевый волоконный суперлюминесцентный источник света с исправленной спектральной характеристикой, способный обеспечить одновременную работу трех одноосных гироскопов;
- многофункциональная интегральная оптическая схема (МИОС) с двухканальным модулятором, х-ответвителем и поляризатором;
- волоконно-оптический контур гироскопа, включающий в себя катушку с сохраняющим поляризацию излучения одномодовым оптическим волокном, который пристыкован к МИОС.

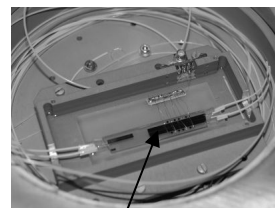
Ключевые функциональные элементы ВОГ показаны на рис. 3. Эти элементы имеют ряд принципиальных особенностей.



Источник света



Катушка с оптическим волокном



МИОС

Рис. 3. Ключевые функциональные элементы ВОГ

Эрбиевый волоконный суперлюминесцентный источник света разрабатывался с учетом следующих обязательных свойств:

- функция когерентности должна быть как можно уже, т. е. нужно использовать источник с широким спектром. При этом форма спектра должна быть симметричной и иметь вид функции Гаусса;

- остаточная поляризация излучения источника должна быть минимальной;
- избыточные амплитудные шумы должны быть сопоставимы с фундаментальными избыточными шумами, которые зависят только от длины волны света, полосы пропускания приемной системы, ширины спектра источника света и оптической мощности, падающей на фотоприемник;
- оптическая мощность источника должна быть не менее 30 мВт для обеспечения работы трех волоконно-оптических интерферометров.

Для получения указанных свойств потребовалась коррекция спектра с помощью дополнительного интерференционного фильтра. Полученная форма спектра приведена на рис. 4.

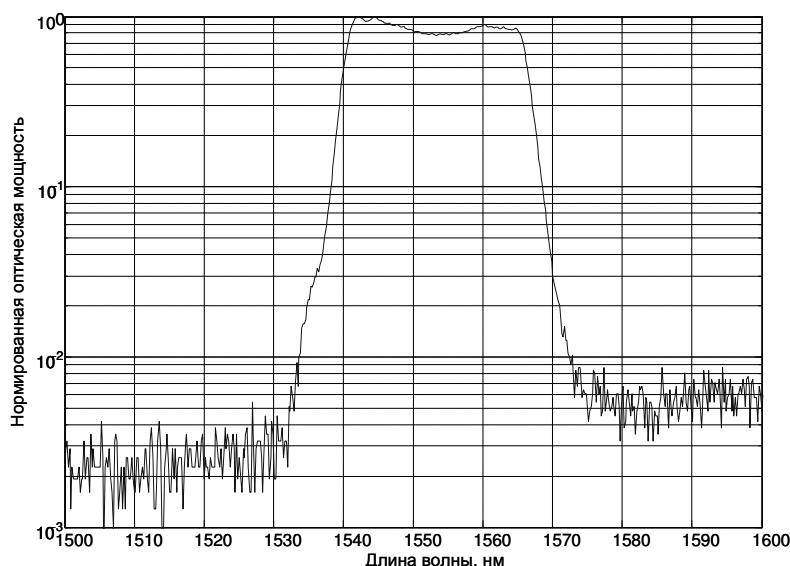


Рис. 4. Форма спектра эрбиевого волоконного суперлюминесцентного источника света

Волоконно-оптический контур каждого из трех интерферометров состоит из катушки диаметром 170 мм, изготовленной из композитного материала на основе кварца с малым значением коэффициента термического расширения. Используется оптическое одномодовое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой, в которой Н-параметр составляет не более $3 \cdot 10^{-6}$ 1/м, а потери не превышают 1,5 дБ/км.

Для воспроизводимости результатов при работе в составе ВОГ волокно подвергается квадрупольной укладке, обеспечивающей физический тепловой контакт различных частей волоконного контура, таким образом, чтобы при изменении температуры происходило симметричное относительно центра волоконного контура нагревание или охлаждение различных частей контура, которое минимизирует воздействие изменений температуры [16]. Волокно закрепляется на катушке с помощью силиконового полимера, обладающего такими физико-механическими свойствами, которые способны обеспечить релаксацию механических напряжений. Для укладки волокна был разработан и изготовлен специализированный станок с программным управлением.

Волоконный контур размещается в магнитном экране с большим коэффициентом экранирования. Система термодатчиков позволяет осуществить температурную коррекцию выходного сигнала. В качестве оптического разветвителя,

поляризатора и модулятора используется многофункциональная интегрально-оптическая схема (МИОС). В отличие от подобных устройств, используемых в ВОГ другими производителями, рассматриваемая МИОС выполнена на кристалле ниобата лития (LiNbO_3) по технологии диффузии титана. Также отличием является использование оптического разветвителя Х-типа, а не Y-типа. Получение световодов по технологии диффузии титана позволяет получить меньшие потери света в световоде и разветвителе, а также более гибко управлять профилем показателя преломления для его согласования с параметрами входных и выходных волоконных световодов. Кроме того, Х-разветвитель позволяет использовать дополнительный входной порт, который используется как технологический для настройки элементов ВОГ (согласования поляризационных осей МИОС с осями волоконного световода).

Несмотря на то что в волноводах, выполненных по протонно-обменной технологии, поддерживается только одна мода, другая мода с ортогональной поляризацией распространяется в подложке и частично захватывается волоконным световодом на противоположном конце. В нашем случае используется поляризатор, который поглощает ортогональную поляризацию, при этом отпадает необходимость увеличивать длину кристалла для уменьшения эффективности захвата света в случае протонно-обменных световодов.

На рис. 5 сравниваются спектры шумов ВОГ-3 и ВОГ фирм «Физоптика» (ВГ-035), ПНПК (БВОГ-120), «Оптолинк» (ПНСК40-18) и IXSEA (IMU-120). Все спектральные кривые построены по результатам обработки данных, полученных в процессе испытаний этих гироскопов в ЦНИИ «Электроприбор». Проведенные испытания подтвердили близость не только уровней шума, но и большинства других характеристик точности перечисленных выше гироскопов, за исключением гироскопа ВГ-035.

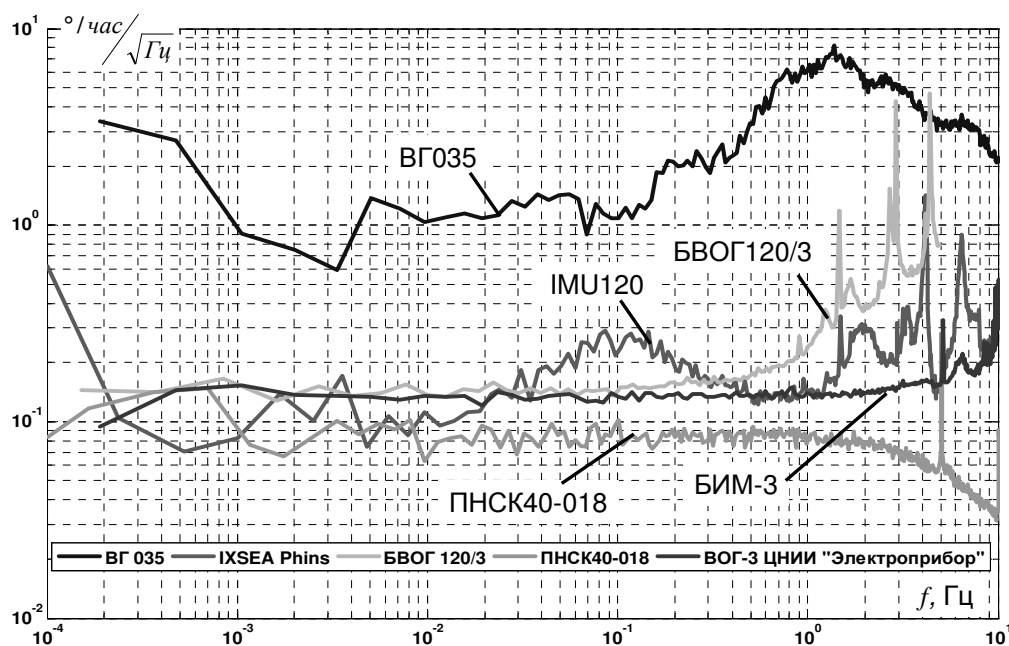


Рис. 5. Спектры шума ВОГ различных изготовителей

Результаты работ по повышению качества ВОГ

Поскольку ВОГ проявляют чрезвычайную чувствительность к изменению температурного поля, то основные усилия разработчиков направлены на разработку алгоритма температурной компенсации.

Для определения параметров компенсации температурного ухода показаний гироскопа были использованы установленные на катушке интерферометра датчики с чувствительностью 0.01°C и высокой стабильностью показаний. Определялся отклик показаний на заданные изменения температуры при различных алгоритмах теплового воздействия. С помощью факторного анализа была построена математическая модель теплового воздействия на показания гироскопа. При анализе использовались значения температур и их производных. На основании этой модели проведена компенсация температурной зависимости показаний гироскопа. Результаты компенсации температурного ухода гироскопа показаны на рис. 6.

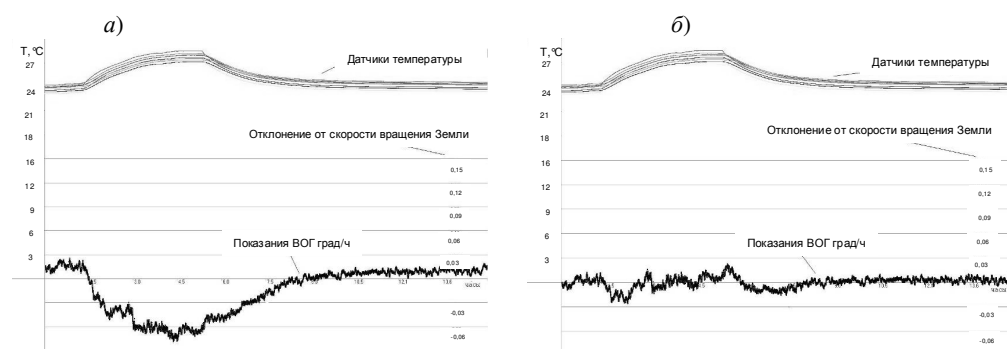


Рис. 6. Выходной сигнал ВОГ без термокомпенсации (а) и с термокомпенсацией (б) при температурном воздействии. Показания гироскопа выделены черным.
Все показания даны при 100-секундном осреднении

В процессе испытаний была выявлена зона нечувствительности разрабатываемых ВОГ. Первоначально она составляла $\sim \pm 0,1^{\circ}/\text{ч}$. Исследования показали, что основной вклад в величину зоны нечувствительности вносит взаимное влияние элементов электрической схемы. Проведенные изменения в конструкции электрической схемы, а также повышение качества сборки интерферометров и электрической части ВОГ

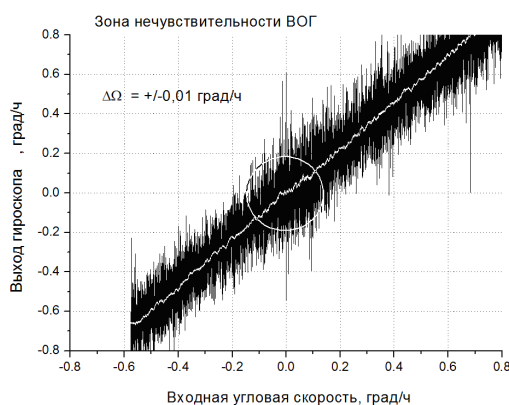


Рис. 7. Зона нечувствительности ВОГ

позволили снизить зону нечувствительности до $0,02^{\circ}/\text{ч}$ ($\pm 0,01^{\circ}/\text{ч}$ от нулевого значения) (рис. 7.) В дальнейшем планируется полностью исключить зону нечувствительности. Установлено, что для этого взаимная связь между элементами схемы должна быть на уровне -70 дБ.

По результатам проведенных экспериментов воспроизводимость выходного сигнала ВОГ от пуска к пуску при постоянной температуре окру-

жающей среды находится на уровне лучше 0,01 °/ч. Изменение сигнала ВОГ от пуска к пуску во всем температурном диапазоне обусловлено разной температурой во время запуска и работы прибора, поэтому в ходе дальнейших работ по реализации температурной компенсации будет улучшаться и воспроизводимость сигнала ВОГ во всем температурном диапазоне.

На сегодняшний момент изготовлено уже более 20 интерферометров, которые используются в варианте трехосного ВОГ в экспериментальных образцах БИНС, а также в одноосном варианте для исследования и отработки отдельных вопросов повышения качества ВОГ.

Ниже приведены характеристики ВОГ совместной разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон» и СПбГУИТМО.

Диапазон измеряемой угловой скорости	± 40 °/с
СКО погрешности измерения угловой скорости при 100-секундном осреднении (1 σ).....	0,01°/ч
Воспроизводимость смещения нуля от пуска к пуску при постоянной температуре	0,01 °/ч
Нестабильность смещения нуля в рабочем диапазоне температур.....	0,05 °/ч
Несимметрия масштабного коэффициента	0,001 %
Нелинейность масштабного коэффициента	0,005 %
Нестабильность МК в рабочем диапазоне температур	0,01 %
Чувствительность к изменению магнитного поля	0,01°/ч/Э
Потребляемая мощность на один ВОГ	4 Вт
Рабочий диапазон температур	+0 ...+40 °С

Направление дальнейших исследований

Дальнейшая работа по улучшению качества ВОГ направлена на повышение точности гироскопов до уровня 0,002-0,001 °/ч. В настоящее время авторы располагают гироскопами, которые соответствуют этому уровню при испытаниях на неподвижном основании, однако полный цикл разработки и испытаний еще не проведен (рис. 8).

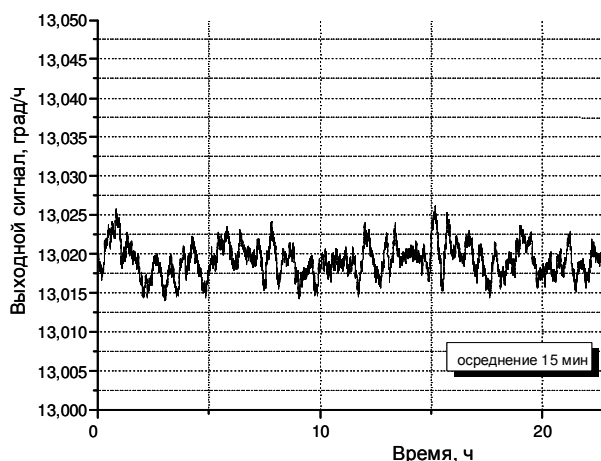


Рис. 8. Выходной сигнал ВОГ на неподвижном основании

Параллельно с повышением качества и технологичности самих ВОГ ведется активная работа по созданию на их базе БИНС для морского применения с погрешностью по координатам на уровне 5 км за 6-8 ч.

В настоящее время достигнуты определенные успехи в отладке алгоритмов и программно-математического обеспечения и вскоре начнется отработка БИНС.

Заключение

Приведены результаты разработки и испытаний волоконно-оптического гироскопа навигационного класса точности, использующего легированный эрбием волоконный источник света, способный обеспечить одновременную работу трех волоконно-оптических контуров. Каждый из контуров включает в себя катушку с сохраняющим поляризацию излучения одномодовым оптическим волокном, многофункциональную интегрально-оптическую схему для фазовой модуляции светового луча и электронный блок для управления обработки в замкнутом контуре сигналов гироскопа.

Испытания подтвердили уровень точности ВОГ, достаточный для создания на его основе БИНС взамен корабельных ИНС средней точности. Итоговой задачей разработки является создание БИНС с погрешностью по координатам на уровне 1 морской мили в сутки.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.fizoptika.ru
2. **Peshekhonov V.G., Nesenyuk L.P., Staroseltsev L.P.** Trends in Development of Miniature Strapdown Inertial Measurement Units in CSRI Elektropribor. Symposium Gyro Technology 2000, Stuttgart, Germany.
3. **Peshekhonov V.G., Nesenyuk L.P., Staroseltsev L.P.** Modern Inertial Instruments for Navigation, Motion Control and Survey. Proceedings of the 11th IAIN World Congress, October 2003, Berlin, Germany.
4. **Peshekhonov V.G., Nesenyuk L.P., Staroseltsev L.P.** Strapdown Gyrocompass Trials with a Multiantenna GNSS Receiver Application. Symposium Gyro Technology 2004, Stuttgart, Germany.
5. **Volk Ch., Lincoln J., Tzartas D.** Northrop Grumman's Family of Fiber-Optic Based Inertial Navigation Systems. PLANS 2006, San Diego, Calif., April 25-27, 2006.
6. www.nsd.es.northropgrumman.com
7. **Paturel Y., V.Rumoro, A.Chapelon, J.Honthaas.** MARINS, the First FOG Navigation System for Submarines. Symposium Gyro Technology 2006, Stuttgart, Germany.
8. www.ixsea.com
9. <http://en.imuworld.com/Production/INS/FOINS/>
10. **Kolevatsov A.P., S.G.Nikolaev, A.G.Andreev, V.S.Ermakov, D.A.Dunaev, O.L.Kel, N.V.Malgin.** Development of a Dual Mode Attitude and Heading Reference System on Fiber Optic Gyros for Land Vehicles. 13th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 29-31, 2006
11. **V.S.Ermakov and oth.** Tests of the Fiber-Optical Gyros Unit in a Structure of the Integrated Navigation System NSI-2000MTF. 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 28-30, 2007.
12. <http://www.ppk.perm.ru/>
13. **Korkishko Yu. N.and oth.** Navigation-Grade Interferometric Fiber Optical Gyroscope. 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 28-30, 2007.
14. www.optolink.ru
15. **Meshkovsky I.K., Strigalyov V.I., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Nesenyuk L.P.** A three-axis fiber-optic gyroscope for marine navigation systems. 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 25-27, 2009.
16. **Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л.** Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Приборостроение. – 2010.
17. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. /Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. -404 с.