

УДК 629.7.054.07

Модель источников шумов и нестабильностей кольцевого моноблочного гироскопа

Ус Н.А.*, Задорожний С.П.**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил

«Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия

**e-mail: us_n@mail.ru*

***e-mail: sergejzadorozhnij@yandex.ru*

Аннотация

В качестве гироскопических датчиков современных высокоточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем воздушных судов используются различные системы, работающие на различных физических принципах. Наибольшее распространение в мире получили лазерные гироскопы, реализующие эффект Саньяка, и отличающиеся конструктивно-технологическим исполнением. В промышленно выпускаемых инерциальных навигационных системах используют два типа таких гироскопов: кольцевой газовый и волоконно-оптический. Относительно недавно в группе лазерных гироскопов появилась новая разработка, занимающая промежуточное место между кольцевыми газовыми и волоконно-оптическими гироскопами. Это устройство получило название «кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом». Принципиальным отличием устройства является наличие многогранного оптического моноблока с расположенной внутри треугольной оптической схемой с

открытыми каналами. Задача формирования двунаправленного оптического сигнала от лазерного диода решается с помощью оригинальной конструкции резонатора-расщепителя. При этом полупроводниковый лазерный диод находится внутри оптической схемы гироскопа. Кольцевой режим оптического сигнала реализуется зеркальной системой. Съём информации об угловой скорости объекта навигации осуществляется обработкой динамической интерференционной картины с выхода гироскопа. Новое конструктивно-технологическое решение гироскопического датчика требует знание его погрешностей на основе соответствующей обобщенной математической модели источников шумов и погрешности. В работе анализируется треугольная моноблочная оптическая схема лазерного гироскопа с повышенной симметрией относительно оси «резонатор-расщепитель – интерференционный смеситель – фотоприемник» с целью оценки ее потенциальных шумов и нестабильностей. Данная оптическая схема ранее не анализировалась из-за не востребованности в кольцевых газовых лазерных гироскопах. Получены оценки потенциальных возможностей данного конструктивно-технологического решения гироскопа в качестве чувствительного элемента инерциальной навигационной системы воздушного судна. Показано, что оптическая схема обладает наличием автоматической внутренней взаимной фазовой модуляции и имеет место компенсация внутренних температурных градиентов объекта исследования. Разработанная конструкция кольцевого моноблочного гироскопа рекомендуется в качестве высокоточного, термостабильного кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом для бесплатформенных инерциальных навигационных систем воздушных судов. Особенности конструктивно-

технологического решения датчика могут являться основой при решении задачи резервирования чувствительных элементов инерциальной навигационной системы.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, эффект Саньяка, кольцевой моноблочный оптический контур, шумы, нестабильность, взаимная фазовая модуляция.

Введение

Перспективой развития летательных аппаратов (ЛА) на ближайшие годы является создание соответствующих робототехнических комплексов летательных аппаратов (РТК ЛА), в том числе и беспилотных летательных аппаратов (БЛА), реализующих автономный полет [1,2]. Важным элементом современного автопилота является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая реализует оперативную готовность навигационной системы (НС) БЛА, являясь автономной и помехозащищенной [3,4]. Современные БИНС БЛА строятся на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ) и волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), которые отличаются реализацией различных физических принципов, точностными и массогабаритными характеристиками [5-8].

НС на базе МЭМС, обладают минимальными массогабаритными характеристиками, являются автономными в базовом варианте, и занимают нишу устройств средней точности. Однако по показателям надежности, точности и стабильности (1-10 град/ч), они не обеспечивают уровень применения на БЛА среднего и дальнего радиуса действия. Точностные характеристики можно частично

компенсировать комплексированием со спутниковыми системами (0,1-1,0град/ч), радиотехническими системами и др. [5]. Однако, применение спутниковой навигации сопряжено с различными проблемами, например, сбоями спутниковых систем в конфликтных районах земного шара.

НС на базе КЛГ и ВОГ занимают нишу автономных высокоточных устройств [6-9]. Потенциальная точность таких систем определяется величиной стабильности гироскопа в пределах 0,1-0,01 град/ч. Ведутся активные работы по дальнейшему повышению точности таких систем [10-12]. Однако применение автономных БИНС на базе КЛГ и ВОГ для БЛА среднего и дальнего радиуса действия и допустимо, и проблематично [13]. Во-первых, имеет место проблема надежности таких БИНС, связанная с отсутствием возможности реализации резервирования датчиков угловых скоростей (ДУС), обусловленной их массогабаритными характеристиками. Во-вторых, экономическая составляющая «цена-качество» таких изделий остается достаточно высокой, а вопросы по импортозамещению комплектующих остаются частично открытыми.

Инерциальные чувствительные элементы (ЧЭ) в БИНС по сравнению с платформенными ИНС работают в более критических режимах. Основная причина – жесткая фиксация ЧЭ относительно корпуса ЛА. Причинами ошибок БИНС могут быть различные режимы полета ЛА: высокие значения угловых скоростей, комбинация линейной и угловой вибраций, виброударные нагрузки, значительные ускорения, медленно меняющиеся ускорения центра масс ЛА, температурный фактор в приборном отсеке и т.п. При этом, конструкционные материалы также ведут себя также нестабильно в рабочих режимах БИНС. Это приводит к

формированию ложных сигналов ЧЭ БИНС. Задача учета этих погрешностей решается путем разработки соответствующей обобщенной математической модели источников шумов и погрешностей соответствующих гироскопических датчиков [6,8].

Относительно недавно разработан новый кольцевой лазерный гироскоп – кольцевой моноблочный гироскоп (КМГ), который является надежным термостабильным устройством, позволяет реализовать задачу миниатюризации чувствительного элемента (ЧЭ) БИНС БЛА среднего и дальнего радиуса действия, повысить надежность НС за счет резервирования гироскопического датчика [14-16]. КМГ является Российской разработкой, в которой применена отечественная элементная база [17,18]. Принципиальным отличием КМГ является наличие многогранного оптического моноблока с расположенной внутри треугольной оптической схемой с открытыми каналами. Режим оптической накачки реализован на базе полупроводникового лазерного диода. Задача формирования двунаправленного оптического сигнала от лазерного диода решается с помощью оригинальной конструкции резонатора-расщепителя. При этом полупроводниковый лазерный диод находится внутри оптической схемы гироскопа. Кольцевой режим оптического сигнала реализуется зеркальной системой. Съём информации об угловой скорости объекта навигации осуществляется обработкой динамической интерференционной картины с выхода гироскопа.

Однако на данный момент исследования треугольной оптической схемы вне рамок кольцевого газового гироскопа отсутствуют по причине ее не востребованности на практике [19,20]. Оптическая схема КМГ работает в другом

специфическом режиме [16]. Новое конструктивно-технологическое решение гироскопического датчика требует знание его погрешностей на основе соответствующей обобщенной математической модели источников ее шумов и погрешности.

Оптическая схема кольцевого моноблочного гироскопа

Конструктивно-технологическим отличием оптикоэлектронной схемы КМГ с ПЛД является: 1) Применение микромощного источника лазерного излучения ПЛД со схемой термокомпенсации рабочей температуры полупроводникового кристалла на основе элемента Пельтье, расположенного в геометрическом центре оптического контура моноблока; 2) Применение открытых оптических каналов в оптическом контуре моноблока; 3) Включение в оптический контур моноблока оригинального внешнего оптического резонатора-расщепителя (РР) для формирования двунаправленного источника излучения ПЛД; 4) Включение в оптический контур моноблока оригинального интерференционного смесителя (СМ), совмещённого с полусферическим зеркалом оптической обвязки треугольной оптической схемы гироскопа. Информация об угловой скорости объекта определяется фазой Саньяка в следующем виде:

$$\Delta\varphi_c = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega = \frac{8\pi S}{\lambda c} \Omega = K\Omega. \quad (1)$$

Здесь S – площадь оптического контура, Ω – угловая скорость объекта, K – масштабный коэффициент оптического гироскопа.

Информационная составляющая гироскопа представляется в виде динамической интерференционной картины, обрабатываемой электронной системой на основе фотоприемного устройства (ФП). Изложенные отличия определили слагаемые обобщенной модели источников шумов и нестабильностей в КМГ с ПЛД (рис.1).

Оценка чувствительности (точности) КМГ с ПЛД. Чувствительность оптических информационно-измерительных систем, к которым относится и оптический гироскоп, ограничивается дробовыми шумами ФП.

Выходной ток ФП пропорционален интенсивности приходящего оптического сигнала:

$$i_{\text{ФП}} = D_{\text{ФП}} \cdot I = (\eta \cdot q \cdot \lambda_0 / h \cdot c) \cdot I_0 . \quad (2)$$

Здесь η – квантовая эффективность ФП; q – заряд электрона; h – постоянная Планка; λ_0 – длина волны оптического излучения; I_0 – интенсивность излучения лазера. Интенсивность на ФП для треугольной оптической схемы с повышенной симметрией относительно линии (РР – СМ – ФП) при любых угловых скоростях будет описываться нечетной функцией [8] и носить практически линейный характер в рабочем диапазоне информационного сигнала:

$$I = 0,5 \cdot I_0 \cdot (1 - \sin \Delta\varphi_c) .$$

(3)

Здесь $\Delta\varphi_c$ – фаза Саньяка.

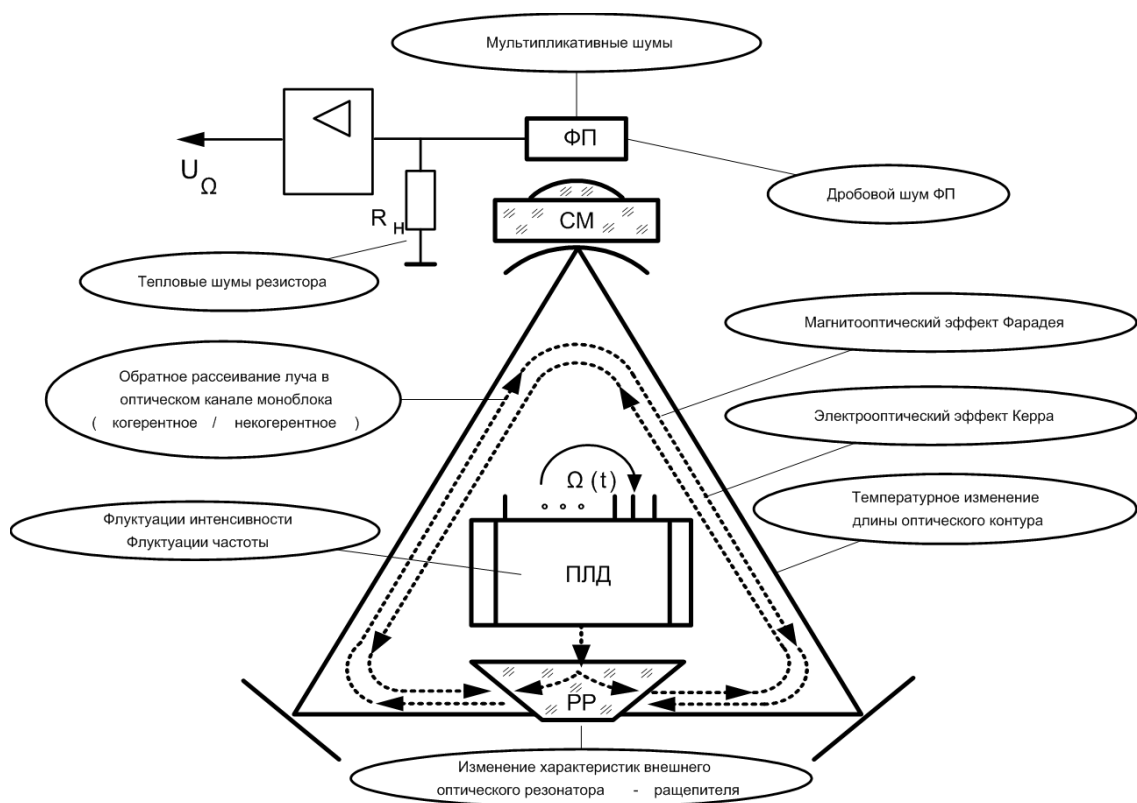


Рис. 1. Обобщенная модель источников шумов и нестабильностей
в КМГ с ПЛД

Если пренебречь постоянной составляющей выходного тока, то на выходе ФП для малых значений информационного сигнала $\Delta\varphi_c$ получим следующее значение Выходного тока:

$$i_{\text{ФП}} = 0,5 \cdot D_{\text{ФП}} \cdot I_0 \cdot \sin \Delta\varphi_c \approx 0,5 \cdot D_{\text{ФП}} \cdot I_0 \cdot \Delta\varphi_c \cdot$$

(4)

Таким образом, значение выходного тока ФП пропорционально фазе Саньяка и угловой скорости вращения гироскопа Ω . При этом, при отсутствии масштабирования оптического моноблока (оптического контура) предельным значением величины фототока ФП можно управлять за счет изменения мощности

оптического излучения ПЛД. Уровень дробовых шумов зависит от интенсивности оптического излучения, падающего на ФП, и определяется флуктуациями интенсивности оптического излучения. Мощность излучения падающего на ФП, с учетом мощности входного излучения P_0 , поступающего в КМГ от ПЛД, определяется следующим выражением:

$$P = 0,5 \cdot P_0 \cdot (1 - \sin \Delta\varphi_c), \quad (5)$$

Дробовые (фотонные) шумы связаны с появлением «фазовых» шумов и определяют ошибку измерения угловой скорости вращения Ω . В целом, число регистрируемых фотонов в единицу времени является величиной случайной и для случая лазерного источника излучения подчиняется распределению Пуассона.

С учетом математического ожидания числа регистрируемых ФП фотонов и среднеквадратического значения «фазового» шума для пуассоновского распределения в случае нормировки по полосе пропускания окончательно получим:

$$\frac{\delta\varphi_c}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{\frac{h \cdot c}{0,5 P_0 \lambda_0}}. \quad (6)$$

Среднеквадратическую ошибку измерения угловой скорости вращения, обусловленной фотонным шумом, можно получить на основании фазы Саньяка:

$$\frac{\delta\Omega_{\min}}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{1}{8\pi \cdot S} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \lambda_0 \cdot c^3}{0,5 \cdot P_0}}. \quad (7)$$

Для типовой схемы КМГ с ПЛД типа LFO-525 для исходных данных $\lambda_0 = 1550 \cdot 10^{-9} \text{ м}$; $P_0 = 5 \text{ мВт}$; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/сек}$ получены следующие оценки параметров:

$$\frac{\delta\varphi_c}{\sqrt{\Delta f}} = 0,7 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}, \quad \frac{\delta\Omega_{\min}}{\sqrt{\Delta f}} = 0,31 \cdot 10^{-4} \text{ (град/ч)} / \sqrt{\text{Гц}}.$$

Таким образом, при ширине полосы в 1 Гц предел чувствительности по измеряемой фазе будет составлять $0,7 \cdot 10^{-8}$ рад, а порог регистрации скорости вращения – $0,31 \cdot 10^{-4}$ град/ч.

Из выражений (6) и (7) следует важный вывод: при варьировании площадью оптического контура моноблока S за счет его масштабирования и оптической мощности P_0 ПЛД параметры гироскопа (чувствительность по измеряемой фазе Саньяка и пороговое значение измеряемой скорости вращения) могут управляться. При этом уменьшение полосы пропускания схемы обработки Δf увеличивает предельную чувствительность гироскопа за счет уменьшения дробовых шумов.

Обратное рассеивание луча в оптическом канале моноблока. Среди факторов, ограничивающих кратковременную разрешающую способность оптического гироскопа, наиболее сильное влияние оказывает обратное рассеяние по оптическому пути (когерентное и некогерентное). Свет обратного рассеяния луча в оптическом канале моноблока (свет обратного рассеяния Рэлея) приводит к возникновению множества шумов.

Применительно к реализуемой оптической схеме в КМГ с ПЛД при правильно отъюстированной схеме отражение лазерного луча в воздушном оптическом канале сведено к нулю, т.е. потери для канала длиной 50-200 мм можно считать практически равными нулю. Однако имеют место неоднозначности при взаимодействии луча с системой обвязки оптического контура – зеркалами. Обратнорассеянные волны имеют случайную фазу. Интерференция основных

встречных волн с рассеянными волнами может приводить к флуктуациям сдвига фаз выходного сигнала. Оценим погрешность измерения скорости вращения, обусловленную рэлеевским рассеянием света при условии, что потери энергии распределены равномерно по длине оптического канала. При однократном обходе оптического канала потери мощности описываются следующим выражением:

$$P_1 = 0,5 \cdot P_0 \cdot e^{-\alpha_s L},$$

где α_s – коэффициент рассеяния; L – длина оптического контура моноблока; P_0 – мощность излучения ПЛД, поступающая в одном направлении оптического контура. По закону Ламберта доля рассеянного света P_s , взаимодействующая со встречной основной волной, учитывает телесный угол ввода в оптический канал отраженного от зеркала рассеянного излучения, равный $\frac{\pi}{4} \beta^2$, где β – линейный угол, и коэффициент Q , отражающий направленность рассеяния отраженного от зеркала излучения в оптический канал вдоль его оси.

Комбинация двух пар взаимно противоположных волн в лазерном гироскопе, с учетом эффекта обратного рассеивания на зеркалах оптического контура, определяет максимальное приращение фазы в следующем виде:

$$\Delta \varphi_{\max} = \varphi_1 + \varphi_2 = 2 \sqrt{\frac{P_s}{P_1}} = \beta \sqrt{Q \alpha_s L}. \quad (8)$$

Здесь φ_1, φ_2 – фазовые набегі прямой и обратной волн. Оценка максимального изменения сдвига фаз выходного сигнала для треугольной оптической схемы с длиной канала 100 мм длина оптического контура составит $L=0,3$ м, а при $Q=1$, $\alpha_s = 10^{-12}$ 1/м, $\beta = 0,1$ рад будет равна $\Delta \varphi_{\max} \approx 0,55 \cdot 10^{-7}$ рад. Оценка максимальной

погрешности измерения угловой скорости вращения для исследуемой оптической схемы КМГ с ПЛД может быть получена на основании выражения для эффекта Саньяка:

$$\Delta\Omega_{\max} = \frac{\Delta\varphi_{\max}}{K} = \frac{\Delta\varphi_{\max} \cdot \lambda \cdot c}{8\pi S} = 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ рад} / \text{с} . \quad (9)$$

Полученные оценки влияния обратного рассеивания на точностные параметры гироскопа оказывают ничтожно малое влияние. Однако, изменение условий эксплуатации при наличии открытых оптических каналов в КМГ может повлиять на показатель коэффициента рассеяния в сторону его увеличения. Для борьбы с этим фактором может быть применен метод, основанный на использовании источника света с широким спектром и низкой когерентностью. Таким источником может служить микромощный многомодовый ПЛД типа LFO-525.

Влияние эффекта Фарадея. Магнитооптический эффект Фарадея определяет взаимосвязь величины напряженности внешнего магнитного поля и оптических параметров материалов, определяющих оптический контур гироскопа. Эффект Фарадея является невзаимным эффектом и учитывая, что оптический контур образован открытыми оптическими каналами, то невзаимная фазовая разность по замкнутому контуру при интегрировании будет равна нулю. Тем не менее, для устранения возможных случайных ошибок, связанных с наличием магнитных полей бортовой радиоэлектронной аппаратуры, целесообразно применение экранирования оптического контура от его влияния.

Влияние эффекта Керра. Электрооптический эффект Керра проявляется в виде возмущения коэффициента преломления среды под воздействием

распространяющегося в ней электромагнитного поля. Разбаланс мощностей встречных волн в оптическом контуре может приводить к разности набегов фаз и выражаться в сдвиге нуля. Эффект Керра также является невзаимным эффектом. Однако, корректно выполненная юстировка оптического прямого и обратного излучения в контуре с открытыми оптическими каналами приводит к тому, что невзаимная фазовая разность по замкнутому контуру при интегрировании будет равна нулю. Использование многомодового источника лазерного излучения также уравнивает нелинейности для встречных волн и практически полностью ликвидирует паразитный фазовый сдвиг.

Флуктуации интенсивности и частоты микромощного ПЛД.

Микромощный ПЛД типа LFO-525 относится к классу полупроводниковых лазерных диодов со встроенной автоматикой контроля рабочей температуры кристалла излучающего рабочего диода. Схема реализуется путем использования элемента Пельтье, который встроен в корпус изделия. В зависимости от класса автоматической системы управления ПЛД интенсивность излучения и частота контролируются с коэффициентом точности не хуже 10^{-7} . Поэтому с учетом автоматической внутренней фазовой модуляции основного излучения в гироскопе данными медленноменяющимися изменениями можно пренебречь.

Влияние температурных градиентов. В оптических гироскопических системах доминирующим фактором нестабильности нуля принято считать изменение температуры окружающей среды, что влияет на геометрические размеры оптического контура, а, следовательно, и на измеряемую угловую скорость объекта. Будем считать, что выходные параметры микромощного ПЛД стабильны в рабочем

диапазоне температур за счет автоматизации стабилизации температуры рабочего кристалла, реализуемого соответствующим драйвером. При этом в оптическом контуре присутствует автоматический режим внутренней взаимной фазовой модуляции, присущий данной оптической схеме. Температурная чувствительность фазы Саньяка может быть получена на основе выражения (1):

$$\frac{d\varphi_c}{dT^0} = \frac{dS}{dT^0} \frac{8\pi}{\lambda c} \Omega = \frac{dS}{dT^0} \rho \Omega. \quad (10)$$

В качестве конструкционного материала моноблока будем рассматривать пластмассы. Это позволит оценить максимальную чувствительность оптической части гироскопа по температуре. Однако, при этом существенно меняется и время обхода τ для волны вдоль периметра оптического контура:

$$\frac{d\tau}{dT^0} = \frac{4S}{c^2} \Omega = \frac{dS}{dT^0} \rho \Omega. \quad (11)$$

Но время обхода волной периметра оптического контура определяет частоту взаимной модуляции в контуре как $\omega_m = 1/\tau$. Можно показать, что чувствительность частоты модуляции от температуры в оптическом контуре носит взаимно противоположный характер:

$$\frac{d\omega_m}{dT^0} = \frac{1}{\rho \Omega} \cdot \frac{dT^0}{dS}. \quad (12)$$

Отсюда вытекает, что площадь оптического контура и частота внутренней модуляции является взаимными компонентами в моноблочной оптической схеме ЧЭ и температурный градиент фактически купируется за счет внутрисистемных параметров оптической схемы КМГ с ПЛД.

Дополнительно в оптический контур моноблока включен внешний оптический РР, реализующий функцию формирования двунаправленного луча от однонаправленного ПЛД. Учитывая, что мощность излучения ПЛД может достигать 250 мВт, то в качестве конструкционного материала РР будет применяться материал на основе кремния. Учитывая, что линейные размеры РР не превышают 30x15x15 мм, то их изменениями в области рабочих температур можно пренебречь.

Выводы

1. Предлагаемая оптическая схема КМГ с ПЛД обладает приемлемыми параметрами для создания высокоточного гироскопа и может быть применена в качестве чувствительного элемента БИНС с резервированием.

2. Температурный градиент в оптической схеме купируется за счет внутрисистемных параметров оптической схемы на основе автоматической внутренней невзаимной фазовой модуляции, т.к. площадь оптического контура и частота фазовой модуляции являются в моноблочной оптической схеме гироскопа взаимными компонентами. Это обеспечивает высокостабильный температурный ноль измерительной схемы.

3. Конструктивно-технологическое исполнение кольцевого моноблочного гироскопа может служить основой при решении задачи резервирования чувствительных элементов инерциальной навигационной системы.

Библиографический список

1. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. – М.: Наука, 1966. - 580 с.
2. Несенюк Л.П. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Обзор состояния и перспективы развития // Гироскопия и навигация. 2002. №1 (36). С. 13 - 22.
3. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. - СПб: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. – 280 с.
4. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
5. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 225 с.
6. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005.– 139 с.
7. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. – Киев: Выща школа, 1988. – 388 с.
8. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 151 с.
9. Лукьянов Д.П. Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: состояние и тенденции развития // Гироскопия и навигация. 1998. № 4 (23). С. 23 - 45.
10. Чернодаров А.В. Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. – М.: Научтехлитиздат, 2017. – 300 с.

11. Слесаренок С.В., Шепеть И.П., Рубинов В.И., Типов Ю.П. Автокомпенсация погрешностей навигационных датчиков бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66381>
12. Чернодаров А.В., Иванов С.А. Идентификация моделей и адаптивная фильтрация шумов инерциальных измерителей // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91962>
13. Ус Н.А. Навигационные системы подвижных объектов МЧС // Международная научно-практическая конференция «Комплексные проблемы техносферной безопасности». Сборник материалов (12 ноября 2015, Воронеж). – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2015. Ч. 2. С. 46 - 54
14. Ус Н.А., Задорожний С.П. Моноблочный лазерный гироскоп с полупроводниковым излучателем – элемент инерциальной навигационной системы // Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки». АВИАТОР. Сборник тезисов докладов (Воронеж, 12-14 февраля 2014). - Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. С. 148 - 150.
15. Ус Н.А., Задорожний С.П. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом: особенности конструктивно-технологического решения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 65 - 72.

16. Ус Н.А., Задорожний С.П. Модель треугольной оптической схемы с повышенной симметрией лазерного гироскопа // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2018. № 2. С. 15 – 23.
17. Ус Н.А. Лазерный гироскоп. Патент № 2507482. Бюлл. № 5, 20.02.2014.
18. Архипов. В.А., Полутов А.Г., Ус Н.Г., Склярова О.Н., Задорожний С.П., Смирнов П.В. Лазерный гироскоп. Патент № 2582900. Бюлл. № 12, 27.04.2016.
19. Ring laser, in particular for a ring laser type of gyro, having a block with an optical resonator cavity and three corner mirrors. Patent US 4666302 (A). 1987. URL: <http://www.rad.pfu.edu.ru/resursy-svobodnogo-dostupa/baza-patentov-ssha-united-states-patent-and-trademark-office>
20. Лукьянов Д., Филатов Ю., Голяев Ю., Курятов В., Виноградов В., Шрайбер К.У., Перлмуттер М. 50 лет лазерному гироскопу // Фотоника. 2014. № 2 (44). С. 20 - 36.