

УДК 629.7.054.07

Математическая модель оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа

Ус Н.А.* , Авершин А.А.**

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: aavershin@yandex.ru*

Аннотация

Создание БИНС является одним из приоритетных направлений отечественного и зарубежного приборостроения. К ним предъявляются высокие требования по точности, доступности, непрерывности и надежности функционирования для различных режимов работы подвижных объектов. Обеспечить выполнение этих требований на современном этапе развития техники можно при использовании в качестве чувствительных элементов инерциальной навигации лазерных гироскопов. В исследовании рассматривается новый сегмент лазерных гироскопов – кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ с ПЛД) вобравший в себя достоинства известных газовых кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ) и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Применения в качестве чувствительного элемента БИНС нового датчика угловых скоростей типа КМГ с ПЛД позволяет упростить конструкцию, юстировку и технологию производства, а также варьировать точностными параметрами модификаций объекта за счет масштабирования геометрии моноблока и управления

режимом излучения лазерного диода. Все это делает актуальной задачу анализа конструкции и процессов, протекающих в оптической схеме КМГ с ПЛД, с целью дальнейшего повышения надежности выходных характеристик навигационной системы. В работе представлены и исследованы математические модели базового конструктивно-технологического решения КМГ и с повышенной добротностью, отличающегося включением в оптический контур высокодобротных оптических резонаторов по типу Фабри-Перо. Математические модели реализованы с применением векторно-матричного аппарата основу, которого составляет - закон ABCD матрицы. Разработан алгоритм расчета добротности оптической схемы КМГ с открытыми оптическими каналами. Проанализированы результаты моделирования треугольной оптической схемы двух конструктивно-технологических решений для длин оптических каналов 50, 100, 150, 200 мм и систематизированы рациональные варианты конструкции КМГ.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, оптическая схема, модель, векторно-матричный аппарат, кольцевой моноблочный, гироскоп, резонатор Фабри-Перо.

Введение

В современном авиационно-космическом приборостроении широкое применение находят пилотажно-навигационные комплексы и системы управления, построенные на бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) [1-3].

Специфика использования оптических гироскопических датчиков БИНС маневренных летательных аппаратов (ЛА), характеризующихся большим

диапазоном угловых скоростей, определяет жесткие требования, как по стабильности собственного дрейфа гироскопа, так и по стабильности его масштабного коэффициента. Наибольшее распространение в качестве гироскопического датчика БИНС получили лазерные гироскопы (ЛГ) благодаря широкому диапазону измеряемых угловых скоростей – сотни градусов в секунду, стабильности масштабного коэффициента – $(1-10) \cdot 10^{-6}$, стабильности собственного дрейфа – 0,005 ... 0,05 град/час, удобству сопряжения с вычислительной техникой [4-6].

Перспективы развития БИНС на ЛГ связаны, с одной стороны, с увеличением числа потребителей (малая авиация, наземный транспорт, маломерные суда), что требует улучшения их надежности и эксплуатационных характеристик при уменьшении габаритов и массы, а с другой стороны, с ужесточением требований со стороны традиционных потребителей. Опыт разработки ЛГ показывает, что основной погрешностью этих приборов, определяющей возможность их использования в качестве датчиков БИНС, является случайный дрейф. Другой проблемой является улучшение эксплуатационных характеристик, среди которых одной из важнейших является технический ресурс, связанный с надежностью навигационной системы, и ее массогабаритные характеристики [7-10]. Решение проблемы – создания ЛГ с улучшенными точностными, надежностными, эксплуатационными и массогабаритными характеристиками.

В работе рассматривается новый сегмент лазерных гироскопов – кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ с ПЛД) [11]. Данное устройство вобрало в себя достоинства ранее используемых газовых

кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ) и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Применение в качестве чувствительного элемента БИНС датчика угловых скоростей типа КМГ с ПЛД позволяет упростить конструкцию, юстировку и технологию производства, а также варьировать точностными параметрами модификаций объекта за счет масштабирования геометрических размеров моноблока и управления режимом излучения лазерного диода. Все это делает актуальной задачу анализа конструкции и добротности оптической схемы КМГ с ПЛД с целью дальнейшего повышения надежности и точности выходных характеристик навигационной системы.

Математическая модель оптического контура базовой схемы кольцевого моноблочного гироскопа

Объектом исследования является кольцевой моноблочный гироскоп, сопряженный с полупроводниковым лазерным диодом в качестве источника оптического излучения (рис.1). Функции сопрягающего элемента выполняет оптический резонатор-расщепитель 1, что позволяет оптический поток источника оптического излучения 5 направить в оптический контур моноблока 2 и в комплексе с элементами обвязки (система зеркал 3 и интерференционный смеситель 4) создать гироскоп новой конструкции. Для технологической реализации оптического контура в моноблоке используются технологические области 6, которые других функций не выполняют. В основе рассматриваемого КМГ с ПЛД лежит треугольная оптическая схема кольцевого резонатора (КР).

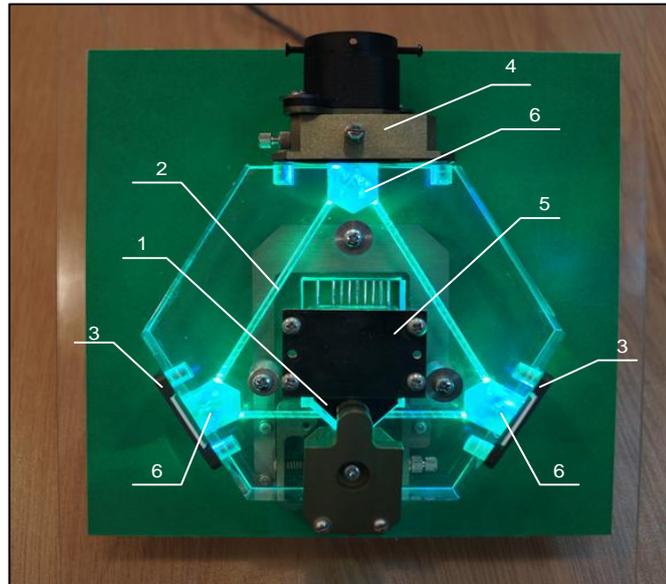


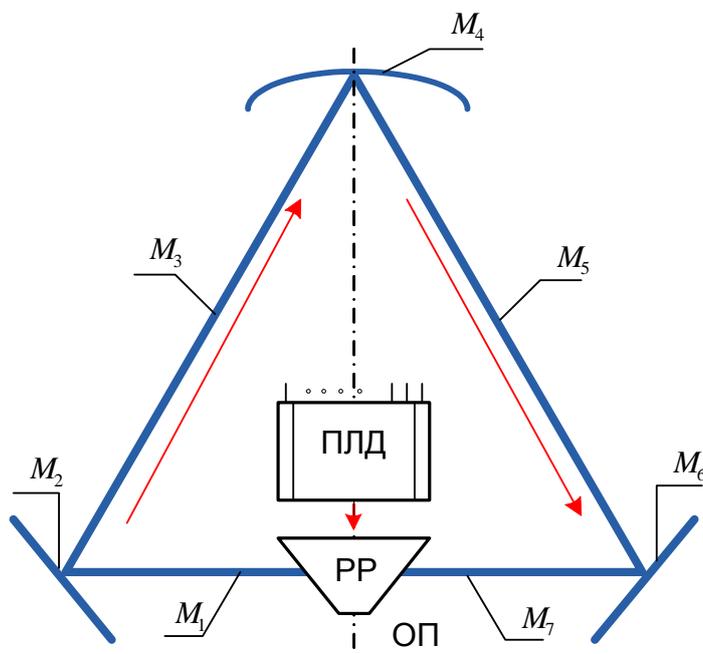
Рис. 1. Макетный образец кольцевого моноблочного гироскопа
с полупроводниковым лазерным диодом

Для расчета параметров формируемого лазерного излучения в КР удобно использовать векторно-матричный аппарат. Его основу составляет – закон ABCD матриц [12]. Для применения закона ABCD пространственные характеристики лазерного излучения описываются гауссовыми волнами, которые оказываются собственными для оптических резонаторов, образованных гауссовыми элементами. Интерференционные зеркала в параксиальном приближении являются такими же элементами, поэтому применение данного закона не противоречит физическим свойствам рассматриваемого резонатора в целом.

Оптическую схему, состоящую из множества последовательно расположенных оптических элементов, можно представить эквивалентной матрицей M в виде произведения матриц отдельных составляющих элементов M_1, M_2, \dots, M_n

, записанных справа налево в том порядке, в котором оптический гауссов пучок проходит эти элементы:

$$M = M_n * M_{n-1} * \dots * M_2 * M_1 = \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix}. \quad (1)$$



ОП- опорная плоскость, M_1, M_3, M_5, M_7 – матрица перемещения в оптическом канале, M_2, M_4, M_6 – матрица отражения от зеркальных поверхностей

Рис.2. Треугольная оптическая схема кольцевого лазерного гироскопа с дополнительной симметрией

На рисунке 2 представлена базовая треугольная оптическая схема КМГ с ПД. Схема является симметричной относительно опорной плоскости (ОП). Математическая модель оптического контура базовой схемы кольцевого моноблочного гироскопа с учетом (1) будет иметь следующий вид:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2*n_6} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_6} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2*n_c}{r} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_6} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2*n_6} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Модель включает относительно ОП последовательное соединение следующих элементов: сквозных оптических каналов оптического контура моноблока, описываемых матрицами перемещения M_1 , M_2 , M_3 , M_5 и M_7 ; зеркальной системы обвязки оптического контура, описываемых матрицами отражения от зеркальных поверхностей M_2 , M_4 и M_6 .

Добротность базового оптического контура моноблока будет определяться потерями энергии оптического потока источника лазерного излучения с выхода резонатора-расщепителя (РР), связанными с явлением переотражения в оптических каналах и зеркалах обвязки, т.е. шумовым фактором оптико-электронной схемы. Данные потери будут зависеть от грамотности выполненных расчетов оптической схемы и уровня технологии их изготовления. Снизить этот уровень потерь можно путем введения в оптическую схему дополнительных высокодобротных оптических резонаторов, обеспечивающих, как минимум, компенсацию указанных энергетических потерь.

Способ повышения добротности оптического контура базовой схемы кольцевого моноблочного гироскопа

Исследуемая базовая треугольная оптическая схема кольцевого моноблочного гироскопа должна отвечать требованиям устойчивости и иметь минимальную расходимость лазерного излучения для формирования четкой динамической

интерференционной картины на выходе оптико-электронной схемы гироскопа. Анализ конструктивно-технологического решения КМГ с ПЛД (рис.1) указывает на скрытые потенциальные возможности его оптической схемы. Разработанный способ повышения добротности базовой оптической схемы заключается в трансформации технологических областей б (рис.1) в высокодобротные оптические резонаторы типа Фабри-Перо, в которых резонансная длина волны равна рабочей длине волны гироскопа, т.е. равна рабочей длине волны полупроводникового лазера.

Различают оптические резонаторы трех базовых конструкций (рис.3) [13]. Их особенности определяются различием радиусов кривизны взаимно отражающих поверхностей. Это определяет их характер функционирования. Оптические объемные резонаторы типа «а» и «б» являются устойчивыми, «в» – неустойчивый. Очевидно, что конструктивно-техническое решение высокодобротных оптических резонаторов должно отвечать требованиям устойчивости. Достоинствами устойчивых резонаторов являются: малый порог генерации и максимальная интенсивность в центре оптического потока при малой расходимости излучения. На практике класс объемных сферических резонаторов реализуют устойчивые резонаторы типа «а» и «б». Оптический объемный резонатор тип «в» на практике не используется по причине большой расходимости лазерного излучения после отражения от зеркал.

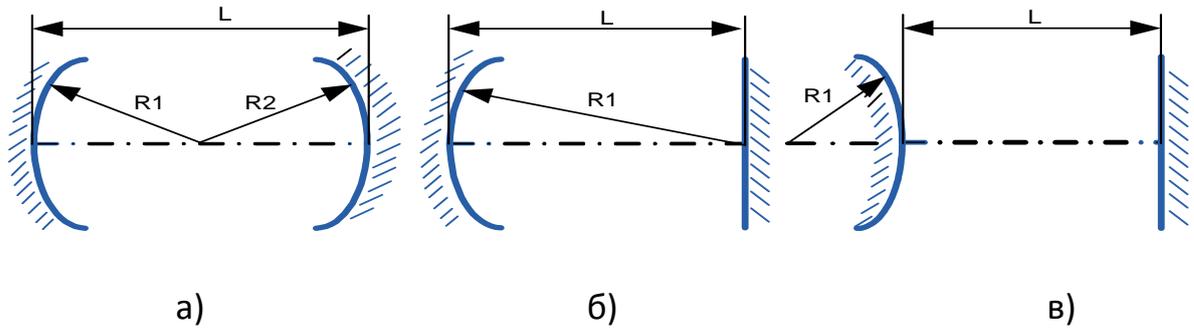
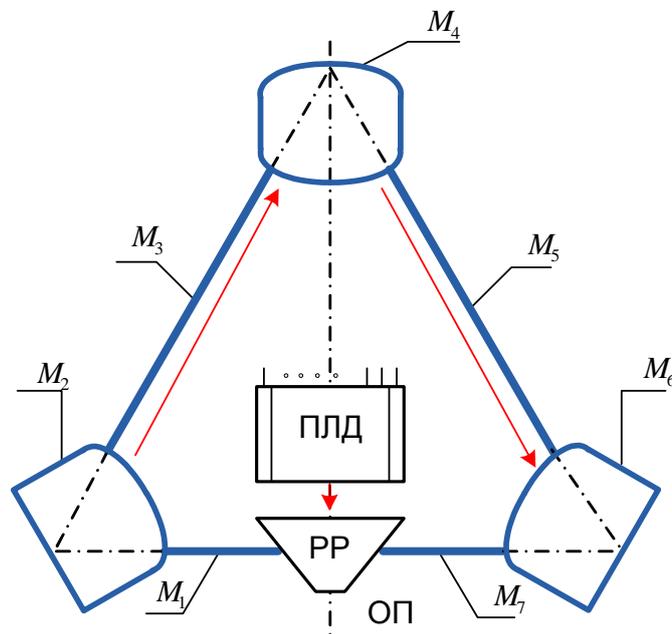


Рис. 3- Оптические объемные резонаторы:

а - сферический, б - полусферический, в - неустойчивый резонаторы

На рисунке 4 представлена разработанная треугольная оптическая схема КМГ с ПЛД с дополнительными высокодобротными цилиндрическими оптическими резонаторами на основе базовой конструкции гироскопа данного типа (рис.1).



ОП- опорная плоскость, M_1, M_3, M_5, M_7 – матрица перемещения в оптическом канале, M_2, M_4, M_6 – матрица отражения от зеркальных поверхностей

Рис.4. Треугольная оптическая схема кольцевого лазерного гироскопа с

дополнительными высокодобротными цилиндрическими оптическими
резонаторами

Трансформация технологических областей 6 и их интеграция с элементами обвязки 3, 4 позволяют создать высокодобротные оптические резонаторы типа Фабри-Перо. Это дает возможность повысить добротность кольцевой оптической схемы путем компенсации потерь на переотражение лучистой энергии в каналах и зеркалах, а также уменьшить массогабаритные характеристики лазерного гироскопа.

Сферический резонатор (рис.3а) с симметрично расположенными зеркалами, имеющими одинаковый радиус кривизны, расположен на вершине оптической схемы на линии ОП, где производится юстировка оптической системы и съем информации в виде динамической интерференционной картины. Для уменьшения уровня сложности юстировки оптической схемы с зеркалами полного отражения 3 интегрированы полусферические резонаторы (рис.3б), которые также отвечают требованиям устойчивости, но обладают большими значениями расходимости излучения [14].

Математическая модель треугольной оптической схемы кольцевого лазерного гироскопа с дополнительными высокодобротными цилиндрическими резонаторами, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
M = & \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2 \times n_g} - S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 - \frac{4 \times n_c \times S}{r \times n_g} & \frac{2 \times S}{n_g} \\ \frac{8 \times n_c^2 \times S}{r^2 \times n_g} - \frac{4 \times n_c}{r} & 1 - \frac{4 \times n_c \times S}{r \times n_g} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_g} - 2 \times S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\
& \times \begin{pmatrix} \frac{4 \times n_c^2 \times S^2}{r^2 \times n_g^2} - \frac{6 \times n_c \times S}{r \times n_g} + 1 & \frac{2S}{n_g} - \frac{2 \times n_c \times S^2}{r \times n_g^2} \\ \frac{16 \times n_c^2 \times S}{r^2 \times n_g} - \frac{6 \times n_c}{r} - \frac{8 \times n_c^3 \times S^2}{r^3 \times n_g} & \frac{4 \times n_c^2 \times S^2}{r^2 \times n_g^2} - \frac{6 \times n_c \times S}{r \times n_g} + 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_g} - 2 \times S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\
& \times \begin{pmatrix} 1 - \frac{4 \times n_c \times S}{r \times n_g} & \frac{2 \times S}{n_g} \\ \frac{8 \times n_c^2 \times S}{r^2 \times n_g} - \frac{4 \times n_c}{r} & 1 - \frac{4 \times n_c \times S}{r \times n_g} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2 \times n_g} - S \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)
\end{aligned}$$

где L – длина оптического пути, n_b – коэффициент преломления в воздухе, n_c – коэффициент преломления в среде, r – радиус кривизны зеркала, S – длина дополнительного резонатора.

Показатели качества оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа

Полученные математические модели базовой треугольной оптической схемы (2) и треугольной оптической схема с дополнительными высокодобротными цилиндрическими оптическими резонаторами (3) позволяют рассчитать основные показатели качества объекта исследования: 1) область устойчивости оптической схемы; 2) радиус лазерного луча в перетяжке и на оптических элементах схемы; 3) добротность оптической схемы [15].

Область устойчивости оптической системы определяется неравенством на основе элементов главной диагонали (A-D) эквивалентной матрицы M :

$$-1 \leq \frac{A+D}{2} \leq 1. \quad (4)$$

Отличительной особенностью устойчивого резонатора является многократность прохождения излучения через одни и те же элементы оптической системы. Отражение от элементов оптической системы приводит к большим потерям потребляемой мощности P_n , которые в первую очередь обуславливаются дифракционными потерями мощности $P_{\text{диф}}$. За счет расширения пучка часть энергии излучения оказывается за краями отражающих элементов и оптических каналов моноблока. Анализ размеров лазерного луча в перетяжке w_1 и на оптических элементах w схемы позволяет минимизировать потери потребляемой мощности P_n в оптическом контуре, а также получить ограничения на радиус оптических каналов моноблока r :

$$\begin{aligned} P_n &\in P_{\text{диф}} f(w; w_1) \\ P_n &\rightarrow \max_{\{w \neq w_1\}} \quad P_n \rightarrow \min_{\{w \approx w_1\}} \\ r &\geq w, w_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Различие между значениями пучка в перетяжке и на оптических элементах при прочих равных условиях приводит к необходимости увеличения потребляемой энергии. Данные параметры получаются с учетом элементов обратной диагонали (В-С) эквивалентной матрицы М:

$$w_1 = \sqrt{\frac{-\lambda \sin \theta}{\pi C}}, \quad (6)$$

$$w = \sqrt{\frac{\lambda B}{\pi \sin \theta}}, \quad (7)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, В и С – элементы матрицы, θ – угол падения лазерного излучения на отражательный элемент [16].

При нахождении оптимальной конструкции оптической схемы КМГ следует учитывать одно из главных свойств резонаторов – сохранять энергию электромагнитных колебаний, определяемых понятием добротность. Добротность резонаторов рассчитывается как отношение средней накопленной в резонаторе энергии W к величине потерь энергии за период световых колебаний ΔW_T и определяется следующим выражением:

$$Q = \frac{2\pi W}{\Delta W_T}. \quad (8)$$

Выражение (8) является общим для нахождения добротности резонаторов всех типов. В оптическом диапазоне используются открытые объемные резонаторы (рис.3), в которых поле не полностью замкнуто металлической оболочкой. Такие резонаторы отличаются высокими значениями добротности. Потери в таких резонаторах определяются затуханием волны, дифракцией на его концах и неидеальным отражением от поверхности зеркал, но они значительно меньше, чем в просто объемных резонаторах. Для нахождения добротности оптической схемы КМГ с ПЛД выражение (8) представим в следующем виде:

$$Q = \frac{2\pi q}{4L\alpha + p_{\text{диф}} + (1 - |\Gamma_1|^2) + (1 - |\Gamma_2|^2)}, \quad (9)$$

где q – положительное целое число, L – длина оптического пути, α – коэффициент затухания оптической волны, $P_{\text{диф}}$ – относительные дифракционные потери мощности оптического излучения на краях зеркал, Γ_1, Γ_2 – коэффициент

отражения излучения от зеркал по мощности [17].

Алгоритм расчета высокодобротной оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа

Процедура решения частной задачи синтеза рациональной добротной оптической схемы КМГ реализована в рамках разработанного алгоритма расчета оптической схемы (рис.5). В качестве варьируемых показателей базовой конструкции КМГ определены линейные размеры оптического канала треугольной оптической схемы при заданном диаметре оптического канала, выбранной длине волны и оптической мощности излучения лазерного источника.

Целевыми показателями являются – заданная точность гироскопа при максимальной добротности оптической схемы и минимальных геометрических размерах базовой конструкции КМГ.

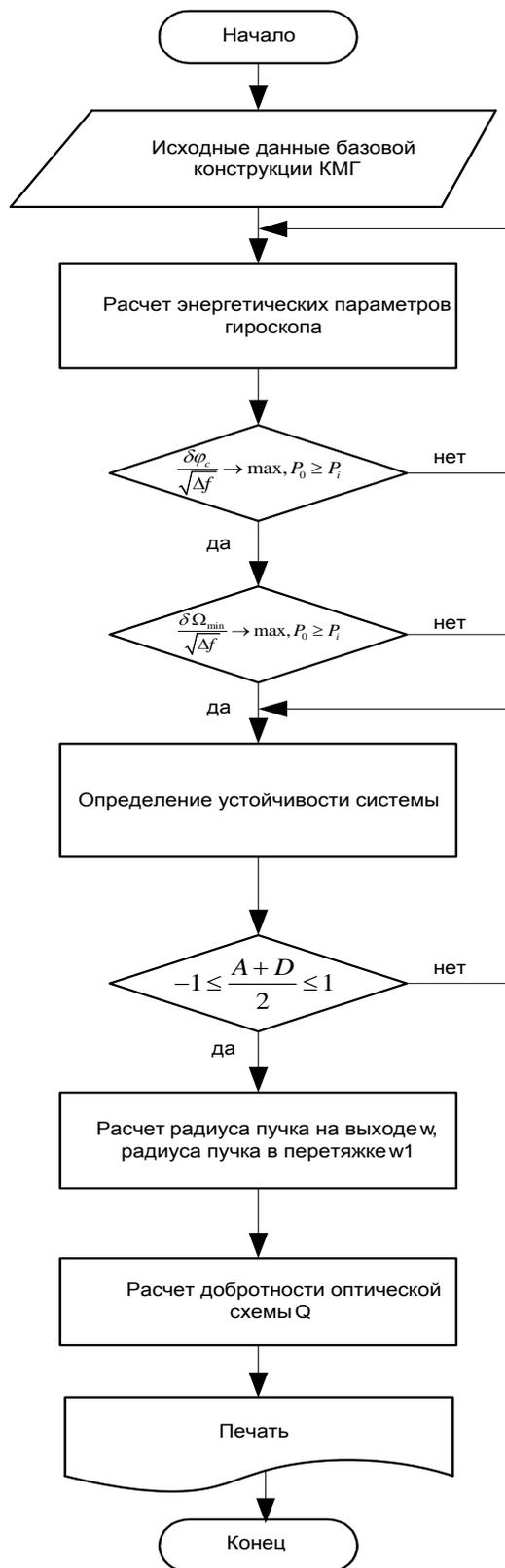


Рис.5. Алгоритм расчета оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа

Работа алгоритма начинается с определения исходных данных базовой конструкции КМГ. На первом этапе путем варьирования оптической мощностью излучения лазерного источника P_0 на заданной длине волны λ_0 и длине оптического канала L (50 мм, 100 мм, 150 мм, 200 мм) вычисляют энергетические параметры гироскопа: предел чувствительности гироскопа по измеряемой фазе и порог регистрации скорости вращения при ширине полосы пропускания схемы обработки в 1 Гц [18]. Этим минимизируются геометрические размеры базовой конструкции КМГ при целевом показателе энергетических параметров и определяются рациональные массогабаритные характеристики его высокодобротной оптической схемы.

На втором этапе определяются оптимальные конструктивные параметры высокодобротной оптической схемы по критерию устойчивости и значению максимальной добротности.

Полученные результаты работы алгоритма формируют совокупность конструктивных параметров для производства рациональной базовой оптико-электронной схемы КМГ с заданным типом лазерного излучателя.

Результаты моделирования

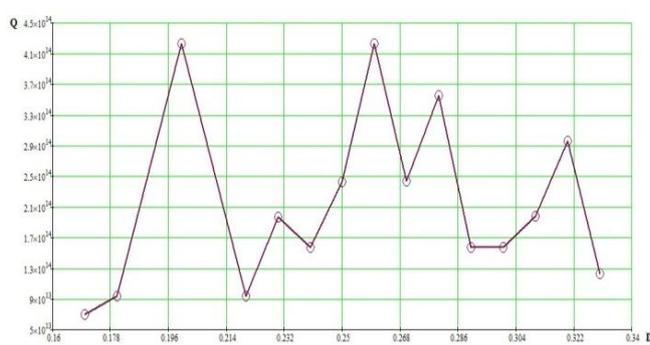
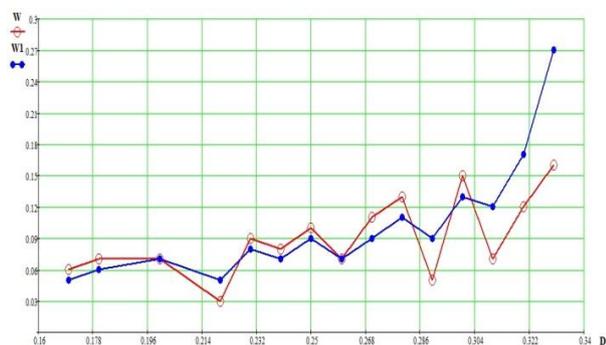
Результаты моделирования базовой треугольной оптической схемы и треугольной оптической схемы с высокодобротными цилиндрическими резонаторами для четырех длин оптических каналов (50 мм, 100мм, 150 мм, 200 мм) и мощности оптического излучения $P_0=5$ мВт представлены на рис. 6-9. Расчеты выполнялись с использованием математических пакетов MATLAB и MATHCAD

[19-20].



a₁)

б₁)

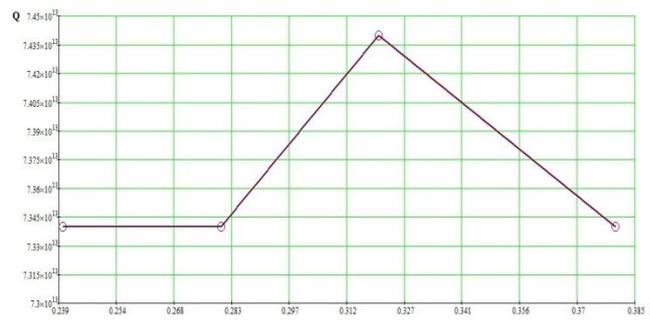
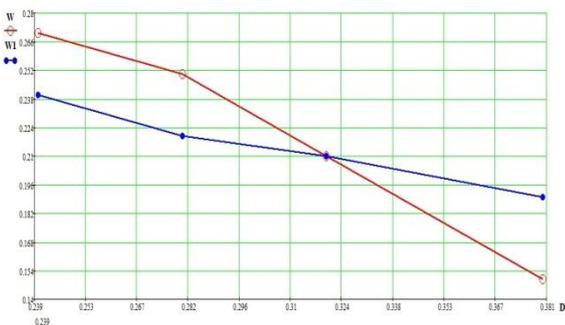


a₂)

б₂)

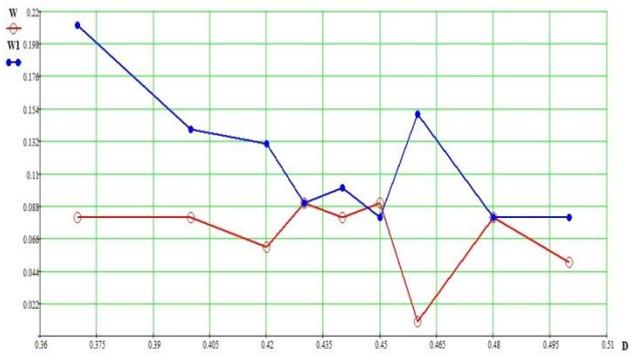
Рис.6. Показатели устойчивости (а) и добротности (б) треугольной базовой (1) и с повышенной добротностью (2) оптической схемы КМГ с длиной канала 50

мм

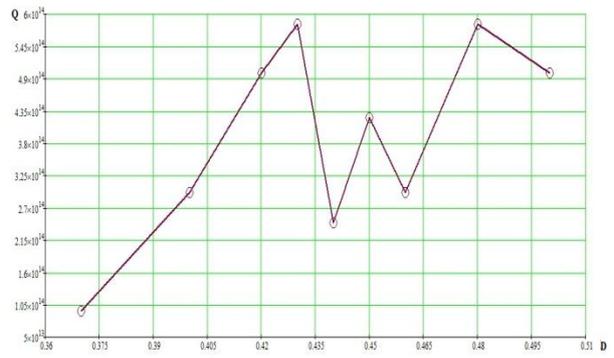


a₁)

б₁)

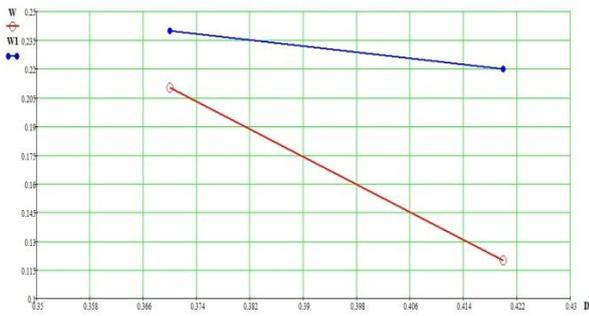


a₂)

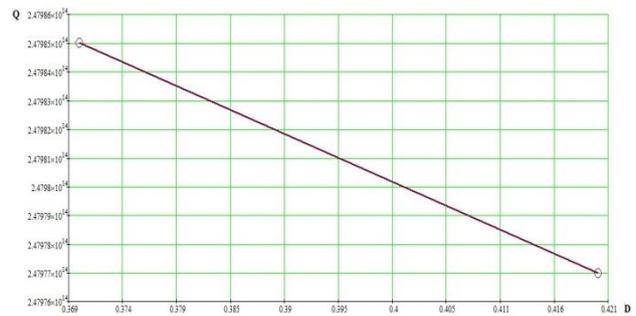


б₂)

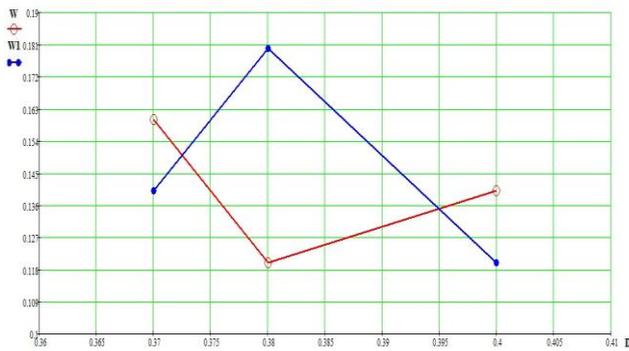
Рис.7. Показатели устойчивости (а) и добротности (б) треугольной базовой (1) и с повышенной добротностью (2) оптической схемы КМГ с длиной канала 100 мм



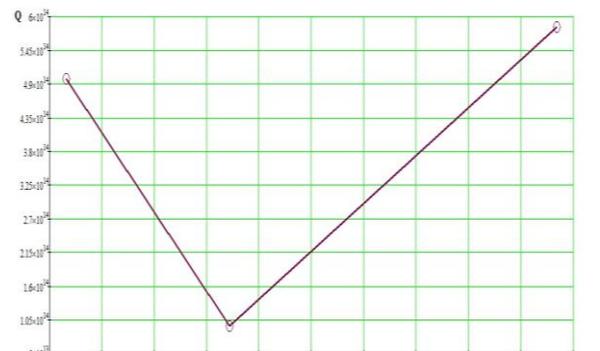
a₁)



б₁)



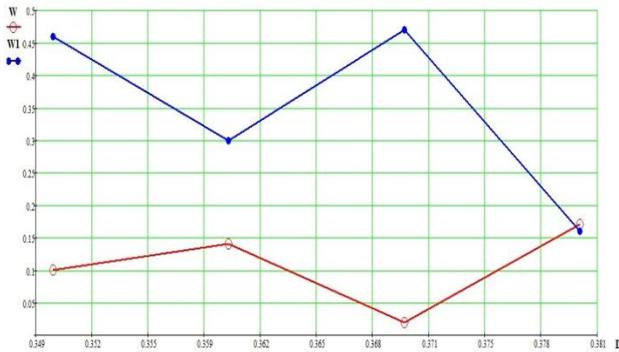
a₂)



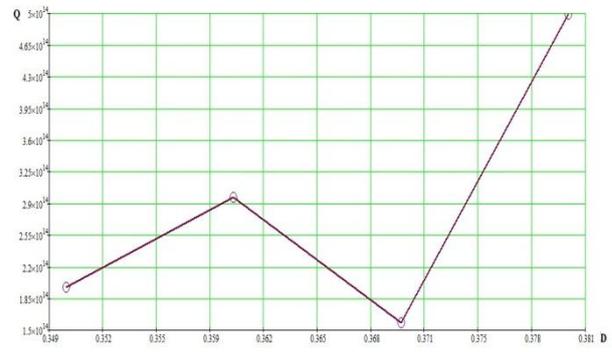
б₂)

Рис.8. Показатели устойчивости (а) и добротности (б) треугольной базовой (1) и с повышенной добротностью (2) оптической схемы КМГ с длиной канала 100 мм

150 мм



а)



б)

Рис.9. Показатели устойчивости (а) и добротности (б) с повышенной добротностью оптической схемы КМГ с длиной канала 200 мм

В таблице 1 представлены систематизированные рациональные варианты конструкции базовой треугольной оптической схемы с различной длиной оптического канала. Анализ показывает, что изменение линейных размеров длины оптического канала от 50 мм до 150 мм приводит к увеличению добротности оптического контура практически на порядок. Однако, при длине канала в 200 мм базовая оптическая схема КМГ является неустойчивой, поэтому результаты расчета показателей устойчивости и добротность системы отсутствуют.

Таблица 1 – Оптимальные варианты конструкции базовой треугольной оптической схемы кольцевого лазерного гироскопа

№	Длина	Радиуса	Радиуса пучка	Радиус	Добротность

п/п	канала, мм	пучка на выходе w, мм	в перетяжке w1, мм	кривизны зеркала, мм	оптического контура Q
1	50	0,24	0,24	410	9,16125E+12
2	100	0,21	0,21	310	7,44E+13
3	150	0,21	0,24	410	2,47985E+14
4	200	система не устойчива			

В таблице 2 представлены систематизированные рациональные варианты конструкции оптической схемы с высокодобротными цилиндрическими резонаторами. Как следует из анализа результатов расчета, радиус кривизны зеркал дополнительных резонаторов практически уменьшился на порядок. Это проявляется в уменьшении его массогабаритных характеристик. При этом оптическая схема при длине оптического канала 200 мм уже является устойчивой.

Таблица 2 – Оптимальные варианты конструкции треугольной оптической схемы с высокодобротными цилиндрическими резонаторами

№ п/п	Длина канала, мм	Радиуса пучка на выходе w, мм	Радиуса пучка в перетяжке w1, мм	Геометрические размеры дополнительных резонаторов, мм		Добротность оптического контура Q
				длина	кривизна зеркала	
1	50	0,07	0,07	12	60	4,23233E+14
2	50	0,07	0,07	13	50	4,23233E+14
3	100	0,09	0,09	15	35	5,82885E+14
4	100	0,08	0,08	19	40	5,83318E+14
5	150	0,14	0,12	20	50	5,82535E+14
6	200	0,17	0,16	19	50	4,98805E+14

Полученные функциональные зависимости добротности Q оптической схемы КМГ имеют максимум в точках совпадения радиуса пучка на выходе w и радиуса пучка в перетяжке w_1 , что не противоречит соответствующим теоретическим положениям.

Результаты моделирования позволяют использовать научно обоснованные оптимальные размеры конструкции лазерного гироскопа по критерию максимальной добротности Q на этапе его проектирования с учетом требуемых энергетических параметров.

Выводы

1. Включение в оптическую схему кольцевого резонатора высокодобротные оптические резонаторы типа Фабри–Перо позволяет повысить добротность базовой треугольной оптической системы кольцевого моноблочного гироскопа более чем на один порядок, при этом массогабаритные размеры конструкции гироскопа значительно уменьшаются.

2. Решение частной задачи синтеза позволяет оптимизировать конструктивно-технологическое решение оптического контура КМГ с ПЛД по критерию максимальной добротности при минимизации потребляемой энергии.

3. Предлагаемая оптическая схема КМГ с ПЛД с дополнительными высокодобротными цилиндрическими резонаторами обладает приемлемыми параметрами для создания высокоточного и надежного гироскопа, что определяет возможность его применения в качестве чувствительного элемента БИНС высокоманевренных летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. - 280 с.
2. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
3. Степанов О.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. 2002. №1 (36). С. 23 – 45.
4. Morris M. Kuritsky, Murray S. Goldstein. Inertial navigation // IEEE, October 1983, vol. 71, no. 10, pp. 47 - 74.
5. Несенюк Л.П. Бесплатформенные инерциальные системы. Обзор состояния и перспектив развития // Гироскопия и навигация. 2002. №1 (36). С. 13 – 22.
6. 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://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=66381>
7. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – 149 с.
8. Бабур Н., Шмидт Дж. Направления развития инерциальных датчиков // Гироскопия и навигация. 2000. № 1 (28). С. 3 - 15.
9. Соколов С.В., Погорелов В.А. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М.: Физматлит, 2009. – 184 с.

10. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. – Кировоград: Полимед-Сервис, 2011. – 171 с.
11. Архипов В.А., Полутов А.Г., Ус Н.А., Склярова О.Н., Задорожний С.П., Смирнов П.В. Лазерный гироскоп. Патент № 2582900 РФ. Бюлл. № 12, 27.04.2016.
12. Кудашов В.Н., Плаченков А.Б., Радин А.М. Комплексные ABCD-преобразования для кольцевых оптических резонаторов с потерями и усилением // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 1, С. 87 – 92.
13. Болотнов С.А., Вереникина Н.М. Лазерные информационно-измерительные системы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. Ч. 1. – 70 с.
14. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
15. Ломакин А.В. Матричные методы в расчете лазерных резонаторов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 31 с.
16. Джерард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику / Пер. с англ. под ред. В.В. Коробкина. – М.: Мир, 1978. - 341 с.
17. Свищев Ю.В. О добротности собственных колебаний электрического типа TM_{0nq} открытого резонатора со сферическими зеркалами // Радиофизика и электроника. 2009. Т. 14. № 2. С. 128 - 132.
18. Ус Н.А., Задорожний С.П. Модель треугольной оптической схемы с повышенной симметрией лазерного гироскопа // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2018. № 2. С. 15 - 24.
19. Авершин А.А., Ус Н.А. Расчет добротности оптического контура кольцевого лазерного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом. Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660692, 28.08.18.

20. Дьяконов В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007 – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.