

УДК 621.375.826:681.2.084

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ТРАНСПАРАНТЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОПОДСТАВКИ В ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

А.А. Авиев^а, В.Н. Енин^б

^а ООО «НПК «Электрооптика», Москва, 107076, Российская Федерация

^б Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация
Адрес для переписки: aviev.aleksey@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.01.18, принята к печати 15.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-197-204

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Авиев А.А., Енин В.Н. Распределение амплитуды оптического поля на транспаранте оптико-электронной системы для измерения параметров виброподставки в лазерном гироскопе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 197–204. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-197-204

Аннотация

Предмет исследования. Исследована оптико-электронная система, позволяющая измерять параметры колебаний виброподставки в кольцевом лазерном гироскопе и служащая для компенсации составляющей его выходного сигнала, обусловленной этими колебаниями. Рассмотрен процесс прохождения лазерного излучения через элементы системы, получено распределение амплитуды оптического поля в плоскости ее транспаранта. Проанализировано распределение амплитуды при малом линейном сдвиге и малом наклоне объектива. **Методы.** Используются элементы методики расчета полей в оптических системах чтения и записи информации на цифровых дисках. Исходные параметры лазерного излучения определены исходя из паспортных характеристик источника излучения. Преобразование излучения оптическими элементами системы осуществлялось путем трассировки лучей с использованием лучевых пакетов. Распределение амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта вычислялось при помощи дифракционного интеграла с учетом аберраций. **Основные результаты.** Показано, что вид распределения амплитуды характерен для дифракционно-ограниченных оптических систем с аберрациями. С использованием результатов моделирования установлено, что зависимости изменения этого распределения от сдвига и наклона объектива имеют линейный характер. **Практическая значимость.** Оптико-электронная система может определять параметры колебаний виброподставки в реальном времени с малыми погрешностями, что позволяет повысить точность работы кольцевого лазерного гироскопа. Анализ и расчет распределения амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта является одним из этапов разработки математической модели оптико-электронной системы. Такая модель позволит в дальнейшем провести детальный анализ погрешностей системы и исследовать процесс ее функционирования.

Ключевые слова

лазерный гироскоп, кольцевой лазер, виброподставка, оптико-электронная измерительная система, оптическое поле, аберрации, дифракция

OPTICAL FIELD AMPLITUDE DISTRIBUTION ON THE PATTERN PLATE OF OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR MEASURING OF DITHER SYSTEM PARAMETERS IN RING LASER GYRO

А.А. Aviev^а, V.N. Enin^б

^а NPK “Electrooptika” corp., Moscow, 107076, Russian Federation

^б Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: aviev.aleksey@gmail.com

Article info

Received 11.01.18, accepted 15.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-197-204

Article in Russian

For citation: Aviev A.A., Enin V.N. Optical field amplitude distribution on the pattern plate of optoelectronic system for measuring of dither system parameters in ring laser gyro. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 197–204 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-197-204

Abstract

Subject of Research. We study the optoelectronic system that measures vibration parameters of dither system in a ring laser gyro and serves for compensation of these oscillations. The paper considers the process of laser radiation passing through the system elements and the optical field amplitude distribution on its pattern plate. The amplitude distribution is analyzed for a small linear shift and a small tilt of the lens. **Methods.** We used the elements of the field calculation methodology in optical systems for information reading and writing from digital disks. Primary laser radiation parameters are determined from passport characteristics of the radiation source. The radiation transformation made by the system optical elements was evaluated by ray tracing using ray packets. The optical field amplitude distribution on pattern plate was calculated by diffraction integral with aberrations. **Main Results.** It is shown that the amplitude distribution is typical for diffraction limited optical system with aberrations. Simulation results give the possibility to discover that the dependences of this distribution on the shift and tilt of the lens are linear. **Practical Relevance.** The optoelectronic system can measure vibration parameters of dither system in real time with small errors and enables the increase of ring laser gyro accuracy. Analysis and calculation of the optical field amplitude distribution on its pattern plate is one of developing stages of the mathematical model for optoelectronic system. In future this model will be applicable for performing a detailed error analysis of the system and exploring its operation.

Keywords

laser gyro, ring laser, dither system, optoelectronic measuring system, optical field, aberrations, diffraction

Введение

Наибольшее распространение среди кольцевых лазерных гироскопов получили приборы с виброподставкой [1–3]. Существенное влияние на точностные характеристики таких гироскопов оказывает система компенсации составляющей сигнала, обусловленной относительными колебаниями кольцевого лазера (КЛ) (далее – составляющей виброподставки) [4]. К таким системам предъявляются жесткие требования по точности, технологичности, надежности и массо-габаритным характеристикам. Известны различные системы и методы компенсации составляющей виброподставки [5–9], однако они имеют ряд недостатков, препятствующих выполнению указанных требований [10]. Для исключения этой составляющей предложено использовать оптико-электронную измерительную систему (ОЭИС), позволяющую определять параметры колебаний виброподставки в реальном времени [10].

Для анализа погрешностей ОЭИС и исследования процесса ее функционирования необходимо иметь соответствующую математическую модель. Одним из этапов разработки такой модели является анализ и расчет распределения амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта. В настоящей работе это распределение исследуется путем моделирования прохождения оптического излучения через элементы ОЭИС с учетом аберраций и явления дифракции.

Принцип действия и элементы оптико-электронной измерительной системы

ОЭИС состоит из транспаранта, оптико-электронного модуля и электронного блока обработки сигналов. Принцип действия системы основан на регистрации лазерного излучения, отраженного от участков транспаранта с измерительными микрометками. Миниатюрный транспарант жестко закреплен на моноблоке КЛ, который за счет вибропривода совершает угловые колебания относительно основания кольцевого лазерного гироскопа. Лазерное излучение формируется оптико-электронным модулем, закрепленным на основании гироскопа, и проецируется на транспарант в виде нескольких световых пятен. При движении КЛ это излучение модулируется измерительными микрометками, отражается от транспаранта и регистрируется оптико-электронным модулем. Дальнейшая обработка и преобразование сигналов осуществляется в электронном блоке.

Выходными сигналами оптико-электронного модуля являются два синусно-косинусных квадратурных сигнала. Значение фазы квадратурных сигналов $\varphi(t)$ позволяет определить такие параметры колебаний КЛ, как его относительное угловое положение, относительная угловая скорость, частота колебаний и пр. Компенсацию составляющей виброподставки целесообразно проводить по угловому положению КЛ.

На рис. 1 представлена схема оптико-электронного модуля с транспарантом. Совокупность элементов 1–7, работающих в прямом ходе лучей, образует передающий канал оптико-электронного модуля. Элементы 3–7 и 10, 11, работающие в обратном ходе лучей, образуют приемный канал оптико-электронного модуля.

В настоящей работе анализ распределения амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта проводится при рассмотрении распространения пучка лазерного излучения, соответствующего нулевому порядку дифракции, через передающий канал оптико-электронного модуля. Дифракционная решетка 2, пластины 3 и 6, а также зеркало 4 существенно изменяют параметры пучка, поэтому в расчетах эти элементы не учитываются. В работе использованы элементы методики расчета полей в оптических системах чтения и записи информации на цифровых дисках [11].

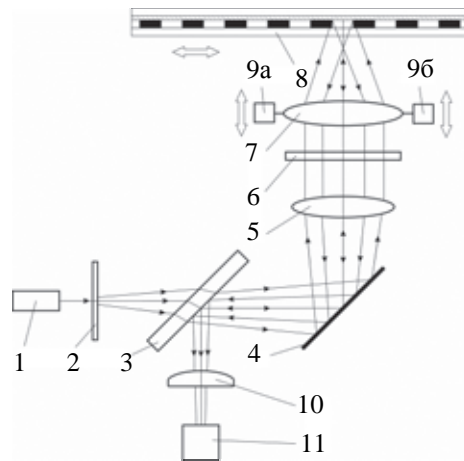


Рис. 1. Функциональная схема опико-электронного модуля с транспарантом:
 1 – полупроводниковый лазер; 2 – дифракционная решетка; 3 – поляризационный светоделитель;
 4 – зеркало; 5 – коллиматор; 6 – четвертьволновая пластинка; 7 – объектив; 8 – транспарант;
 9а, 9б – актюаторы привода перемещения объектива; 10 – цилиндрическая линза;
 11 – многоплощадочный фотодетектор

Методика расчета распространения лазерного излучения в передающем канале опико-электронного модуля

На начальном этапе расчета необходимо получить основные параметры лазерного пучка, которые вычисляются по паспортным данным источника излучения. Для примера в качестве источника был выбран полупроводниковый лазер Sony SLD-104AU, основные характеристики которого приведены в таблице.

Параметр	Типовое значение
Выходная мощность P , мВт	3
Длина волны λ , нм	780
Наибольшая расходимость по уровню 0,5, °	32

Таблица. Основные характеристики полупроводникового лазера Sony SLD-104AU

После перевода паспортных данных источника в величины по уровню амплитуды $1/e$ параметры лазерного пучка вычисляются из выражений [12, 13]

$$z_R = \frac{\lambda}{\pi \cdot \text{tg}^2 \theta_e}, \quad h_p = \frac{\lambda}{\pi \cdot \text{tg} \theta_e}, \quad h(z) = h_p \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2},$$

где z_R – конфокальный параметр; h_p – высота пучка по уровню $1/e$ в плоскости его минимальной ширины (плоскость перетяжки [12, 13]); $h(z)$ – высота пучка по уровню $1/e$ вдоль направления распространения z ; θ_e – наибольшая расходимость пучка по уровню $1/e$. Значение амплитуды лазерного пучка в любой точке находится из соотношений [12, 13]

$$A(x, y, z) = A_0 \frac{h_p}{h(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{h(z)^2}\right), \quad A_0 = \sqrt{\frac{2P}{\pi \cdot h_p^2}}.$$

При вычислении амплитуды предполагается, что начало системы координат $Oxuz$ находится в плоскости перетяжки на оси распространения пучка.

Для лазерного пучка поверхностями равной относительной амплитуды являются однополостные гиперболоиды вращения вида $\rho^2 / \rho_0^2 - z^2 / z_R^2 = 1$, где $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от оси пучка до поверхности гиперболоида в выбранной точке; ρ_0 – высота пучка в плоскости перетяжки, соответствующая тому же уровню амплитуды, что и выбранная точка. Таким образом, лазерный пучок можно представить в виде совокупности вложенных гиперболоидов вращения (рис. 2, а) с общим конфокальным параметром z_R и различными размерами пучка в плоскости перетяжки ρ_0 , соответствующими определенным уровням амплитуды [14, 15].

Прямолинейные образующие однополостного гиперболоида могут быть описаны направляющими векторами:

$$\mathbf{a}_{1,2} = \left\{ \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \left(\frac{x \cdot z}{z_R} \pm y \right); \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \left(\frac{y \cdot z}{z_R} \mp x \right); z_R \right\}.$$

Семейство всех лучей с направляющими векторами $\mathbf{a}_{1,2}$, принадлежащими одному гиперboloиду, образует лучевой пакет (рис. 2, б). Поскольку лучевой пакет описывает пучок только на одном уровне амплитуды, то весь пучок можно описать совокупностью лучевых пакетов.

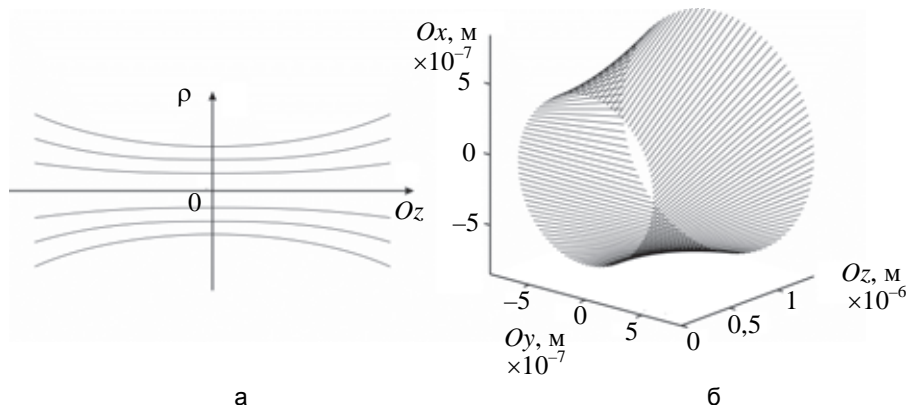


Рис. 2. Линии равной относительной амплитуды лазерного пучка (а); лучевой пакет (б)

Использование лучевых пакетов позволяет выполнить преобразование лазерного излучения в передающем канале оптико-электронного модуля путем расчета хода лучей через элементы его оптической системы (рис. 3).

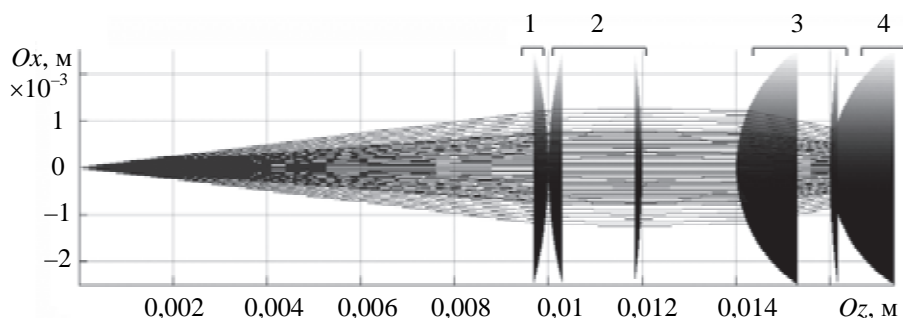


Рис. 3. Трассировка лучей через оптическую систему

На рис. 3 цифрами 1 и 4 обозначены поверхности идеальных волновых фронтов, цифрой 2 обозначен коллиматор, а цифрой 3 – объектив. Поверхности волновых фронтов используются для вычисления волновых aberrаций в процессе трассировки лучей. Источник излучения на рисунке расположен в начале системы координат.

Алгоритм расчета хода лучей содержит два повторяющихся шага: преломление луча на данной оптической поверхности и распространение преломленного луча до следующей поверхности. Преломление выполняется с учетом закона Снеллиуса в векторной форме [16]:

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_{k-1} + (\mathbf{a}_{k-1} \cdot \boldsymbol{\eta}) \cdot \boldsymbol{\eta} \cdot \sqrt{\frac{n_k^2 - n_{k-1}^2}{(a_{k-1} \cdot \boldsymbol{\eta})^2} + 1} - (\mathbf{a}_{k-1} \cdot \boldsymbol{\eta}) \cdot \boldsymbol{\eta},$$

где k – номер оптической поверхности; n_k и n_{k-1} – показатели преломления среды, находящейся после границы раздела и до нее соответственно; \mathbf{a}_k – лучевой вектор преломленного луча ($|\mathbf{a}_k| = n_k$); \mathbf{a}_{k-1} – лучевой вектор падающего луча ($|\mathbf{a}_{k-1}| = n_{k-1}$); $\boldsymbol{\eta}$ – единичный вектор нормали к преломляющей поверхности в точке преломления. Расчет распространения луча до следующей оптической поверхности состоит в поиске точки пересечения данного луча с этой поверхностью. Точка пересечения может быть найдена с использованием уравнений сферической поверхности и прямой, известных из аналитической геометрии:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = R^2,$$

где $\{x_c; y_c; z_c\}$ – координаты центра сферы; R – радиус этой сферы,

$$\frac{x-x_0}{a_x} = \frac{y-y_0}{a_y} = \frac{z-z_0}{a_z} = t,$$

где $\{x_0, y_0, z_0\}$ – координаты точки пересечения луча с предыдущей сферической поверхностью; $\{a_x, a_y, a_z\}$ – координаты лучевого вектора \mathbf{a} ; t – косая толщина.

В связи с тем, что лучевой пакет однозначно связан с некоторым уровнем амплитуды, каждый луч в данном пакете характеризуется значением этой амплитуды. Таким образом, после трассировки лучей на последней поверхности формируется набор точек с известными амплитудами. Для проведения дальнейших расчетов целесообразно выполнить аппроксимацию поверхности, сформированной на основе полученных значений амплитуды. Аппроксимация выполняется по координатам выходного зрачка в виде $A(x, y) = \sum_i \sum_j C_{i,j}^A \cdot x^i \cdot y^j$, где $C_{i,j}^A$ – коэффициенты разложения, вычисляемые по методу наименьших квадратов. Поверхность, аппроксимированная указанным способом, показана на рис. 4, а.

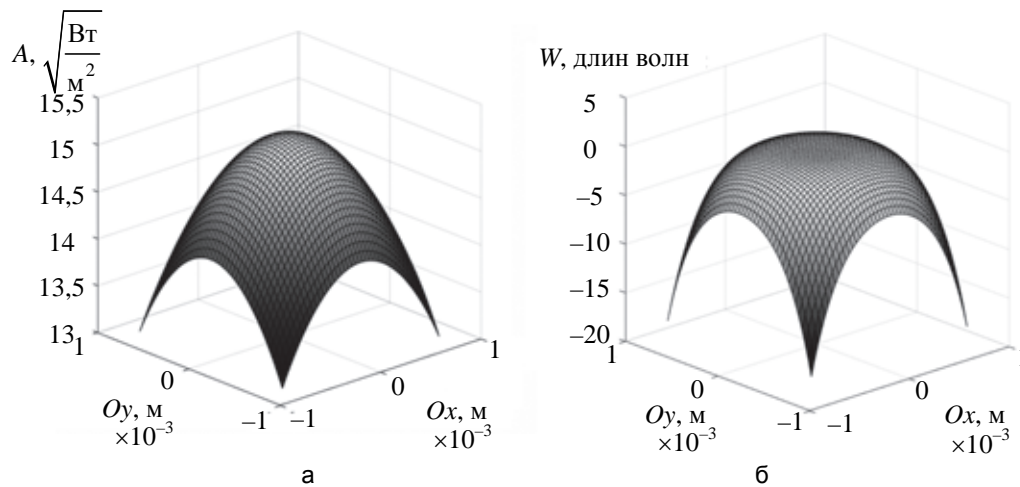


Рис. 4. Поверхности, сформированные по полученным значениям: амплитуды на выходе оптической системы (а); волновой aberrации на выходе оптической системы (б)

Волновая aberrация W_i в процессе трассировки лучей вычисляется как разность оптических путей между волновыми фронтами для i -го и главного лучей: $W_i = \sum_k n_k t_k^{(i)} - \sum_k n_k t_k^{(rn)}$. После трассировки на последней поверхности формируется набор точек с известными волновыми aberrациями. Аппроксимация волновой aberrации выполняется аналогично амплитуде по координатам выходного зрачка в виде $W(x, y) = \sum_i \sum_j C_{i,j}^W \cdot x^i \cdot y^j$, где $C_{i,j}^W$ – коэффициенты разложения, вычисляемые по методу наименьших квадратов. Поверхность, аппроксимированная указанным способом, показана на рис. 4, б.

Распределение амплитуды оптического поля $U(P)$ в плоскости транспаранта может быть получено при помощи дифракционного интеграла Френеля–Кирхгофа [17]:

$$U(P) = -\frac{i}{2\lambda} \iint_{\Sigma} A(M) \frac{\exp[ik(W(M) + S(P, M))]}{S(P, M)} (\cos \alpha + \cos \gamma) d\Sigma,$$

где $A(M)$ – амплитуда в точке M на поверхности Σ , по которой выполняется интегрирование (расположена в области выходного зрачка); $W(M)$ – волновая aberrация в точке M ; $S(P, M)$ – расстояние от точки M до точки на транспаранте P , в которой вычисляется интеграл; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; α – угол между направлением падения излучения на поверхность Σ и нормалью к этой поверхности; γ – угол между направлением дифракции и нормалью к поверхности Σ .

Результаты расчета распределения амплитуды оптического поля

Распределение амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта (световое пятно), полученное расчетным путем, показано на рис. 5.

Рассматриваемая оптическая система имеет ограниченный диаметр выходного зрачка (ограниченную апертуру), влияние которого учитывается с помощью дифракционного интеграла. Величину дифрак-

ции можно оценить, используя известное выражение для диаметра диска Эйри D , содержащего приблизительно 85% световой энергии размытого изображения: $D = 1,22\lambda / NA$, где NA – числовая апертура, зависящая от угла апертурного луча в пространстве изображения. В работе значение числовой апертуры выбрано примерно равным 0,45. С учетом длины волны $\lambda = 780$ нм можно определить, что диаметр размытого изображения составит приблизительно 2,1 мкм. Наличие aberrаций приводит к дополнительному размытию светового пятна, что видно на рис. 5. Таким образом, вид распределения амплитуды характерен для дифракционно-ограниченных оптических систем с aberrациями.

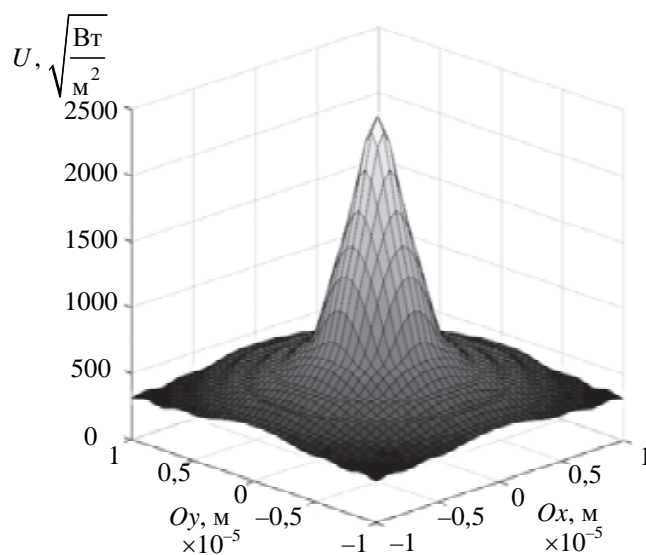


Рис. 5. Распределение амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта

Большой интерес представляет распределение, рассчитанное с учетом изменения взаимного расположения элементов оптической системы, поскольку это влияет на точность ОЭС в целом. Так как все элементы оптической системы, кроме подвижного объектива, закреплены жестко, то рассматривать следует изменение его положения. Привод объектива (рис. 1) допускает перемещение только вдоль оптической оси системы, все остальные перемещения объектива являются нежелательными и могут вызываться несовершенством конструкции привода, а также воздействием внешних возмущений.

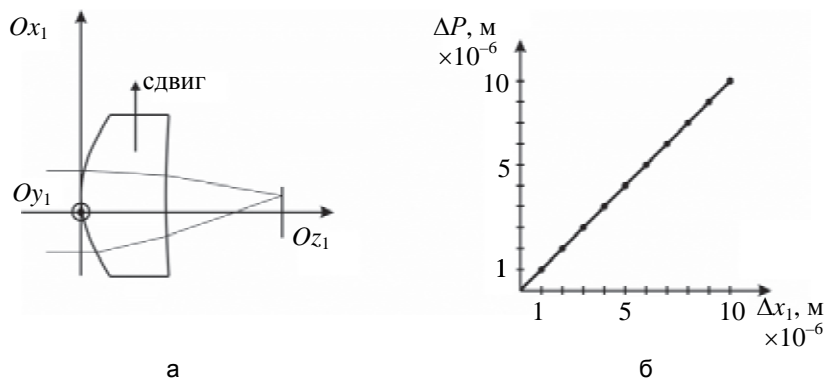


Рис. 6. Схема сдвига объектива (а); зависимость смещения светового пятна от величины сдвига объектива (б)

Рассмотрим случай линейного сдвига объектива вдоль оси Ox_1 на небольшую величину (рис. 6, а). При таком сдвиге световое пятно смещается в плоскости транспаранта, а вид распределения амплитуды оптического поля остается подобным показанному на рис. 5. При рассмотрении нескольких малых значений сдвига объектива можно отметить, что сдвиг приблизительно линейно влияет на смещение светового пятна. График зависимости смещения светового пятна ΔP от величины сдвига объектива Δx_1 приведен на рис. 6, б.

Рассмотрим теперь случай поворота (наклона) объектива вокруг оси Oy_1 на небольшую величину (рис. 7, а). При наклоне объектива световое пятно смещается в плоскости транспаранта, а вид распределения амплитуды оптического поля остается подобным показанному на рис. 5. Исходя из геометрических соображений, можно предположить, что световое пятно будет расположено на пересечении оси объекти-

ва с плоскостью изображения, однако при корректном рассмотрении с учетом приведенной методики это предположение оказывается неверным. Рассмотрение нескольких малых значений угла наклона объектива показывает, что его влияние на смещение светового пятна имеет приблизительно линейный характер. График зависимости смещения светового пятна ΔP от угла наклона объектива β приведен на рис. 7, б.

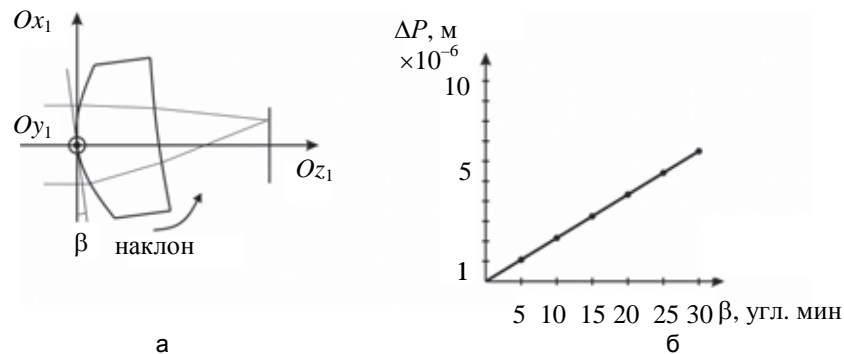


Рис. 7. Схема наклона объектива (а); зависимость смещения светового пятна от угла наклона объектива (б)

Заключение

Описаны элементы оптико-электронной системы, предназначенной для измерения с высокой точностью параметров колебаний виброподставки в кольцевом лазерном гироскопе. В рамках создания математической модели измерительной системы рассмотрен процесс прохождения излучения в передающем канале ее оптико-электронного модуля и получено распределение амплитуды оптического поля в плоскости транспаранта. Проанализировано распределение амплитуды при малом линейном сдвиге и малом наклоне объектива.

Показано, что вид распределения амплитуды характерен для дифракционно-ограниченных оптических систем с aberrациями. С использованием результатов моделирования установлено, что зависимости изменения этого распределения от сдвига и наклона объектива имеют линейный характер.

Литература

1. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // *Optical Gyros and their Application*. RTO-AG-339. 1999. P. 3-1–3-45.
2. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // *Гироскопия и навигация*. 2011. № 1. С. 3–16.
3. Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В., Голяев Ю.Д. и др. 50 лет лазерному гироскопу // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2013. С. 7–21.
4. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Основы теории гироскопов. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2015. 339 с.
5. Ljung B.H.G. Dither pick-off transducer for ring laser gyroscope. Патент US4406965. Опубл. 27.09.83.
6. Зюзев Г.Н. О компенсации частотной подставки лазерного датчика абсолютной угловой скорости // *Труды МВТУ*. 1982. № 385. С. 10–16.
7. Friedland B. System for measuring the position of vibrating object. Патент US4888705. Опубл. 19.12.89.
8. Chen A., Li J., Chu Z. Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter // *Proc. 8th IEEE Int. Symposium on Instrumentation and Control Technology*. London, 2012. P. 178–182.
9. Климович Б.В., Толочко А.М. Корректирующий фильтр для одноосного кольцевого лазерного гироскопа на виброподставке // *Гироскопия и навигация*. 2016. Т. 24. № 2. С. 41–55. doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.2.041-055
10. Авиев А.А. Оптико-электронная система для измерения параметров колебаний виброподставки в кольцевом лазерном гироскопе // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2016. № 6. С. 14–25.
11. Фролов М.Е. Проектирование и расчет высокоапертурных лазерных систем устройств хранения информации на цифровых оптических дисках: дис. ... канд. техн. наук.

References

1. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro. *Optical Gyros and their Application*. RTO-AG-339, 1999, pp. 3-1–3-45.
2. Peshekhonov V.G. Gyroscopic systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
3. Luk'yanov D.P., Filatov Yu.V., Golyaev Yu.D. et al. 50 years laser gyro. *Proc. 20th Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, 2013, pp. 7–21. (in Russian)
4. Luk'yanov D.P., Raspopov V.Ya., Filatov Yu.V. *Fundamentals of the Gyros Theory*. St. Petersburg, ОАО Kontsern TsNII Elektropribor Publ., 2015, 339 p. (in Russian)
5. Ljung B.H.G. Dither pick-off transducer for ring laser gyroscope. *Patent US4406965*, 1983.
6. Zyuzev G.N. On compensation of the frequency base of the laser sensor of absolute angular velocity. *Trudy MVTU*, 1982, no. 385, pp. 10–16. (in Russian)
7. Friedland B. System for measuring the position of vibrating object. *Patent US4888705*, 1989.
8. Chen A., Li J., Chu Z. Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter. *Proc. 8th IEEE Int. Symposium on Instrumentation and Control Technology*. London, 2012, pp. 178–182.
9. Klimkovich B.V., Tolochko A.M. Correction Filter for Mechanically Dithered Single-Axis Ring Laser Gyros. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 41–55. doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.2.041-055
10. Aviev A.A. Optoelectronic system for measuring dither vibrations parameters in a ring laser gyro. *Izvestiya TulGU, Technical Sciences*, 2016, no. 6, pp. 14–25. (in Russian)
11. Frolov M.E. *Design and Calculation of High-Aperture Laser Systems for Data Storage Devices on Digital Optical Disks*. Dis. PhD Eng. Sci. Moscow, 2008, 177 p. (in Russian)
12. Svelto O. *Principles of Lasers*. NY, Plenum Press, 1989.

- Москва, 2008. 177 с.
12. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 560 с.
 13. Пахомов И.И. Расчет преобразования лазерного пучка в оптических системах. М.: МВТУ, 1984. 54 с.
 14. Носов П.А., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Состояние и перспективы развития методов расчета преобразования лазерного излучения оптическими системами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 9. С. 166–177. doi: 10.18698/2308-6033-2012-9-363
 15. Пахомов И.И., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986. 152 с.
 16. DiMarzio C.A. Optics for Engineers. Boca Raton: CRC Press, 2011. 564 p.
 17. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
 13. Pakhomov I.I. *Calculation of the Laser Beam Conversion in Optical Systems*. Moscow, MVTU Publ., 1984, 54 p. (in Russian)
 14. Nosov P.A., Pakhomov I.I., Shirankov A.F. Development condition and prospect of the design methods of laser radiation conversion by optical systems. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 9, p. 166–177. (in Russian). doi: 10.18698/2308-6033-2012-9-363
 15. Pakhomov I.I., Tsibulya A.B. *Calculation of Optical Systems of Laser Devices*. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1986, 152 p. (in Russian)
 16. DiMarzio C.A. *Optics for Engineers*. Boca Raton, CRC Press, 2011, 564 p.
 17. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. NY, Pergamon, 1959.

Авторы

Авиев Алексей Андреевич – ведущий специалист, ООО «НПК «Электрооптика», Москва, 107076, Российская Федерация, Scopus ID: 57190383656, ORCID ID: 0000-0002-8669-5127, aviev.aleksey@gmail.com

Енин Виталий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, Scopus ID: 6603063610, ORCID ID: 0000-0002-0323-4844, enin@bmstu.ru

Authors

Alexey A. Aviev – leading specialist, NPK “Electrooptika” corp., Moscow, 107076, Russian Federation, Scopus ID: 57190383656, ORCID ID: 0000-0002-8669-5127, aviev.aleksey@gmail.com

Vitaliy N. Enin – D.Sc., Full Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, Scopus ID: 6603063610, ORCID ID: 0000-0002-0323-4844, enin@bmstu.ru