

В. В. АЗАРОВА, Ю. Д. ГОЛЯЕВ, Е. В. КУЗНЕЦОВ

## ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ С УЧЕТОМ НЕРАВЕНСТВА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН

*Проведено исследование частотной характеристики лазерного гироскопа путем численного моделирования полной системы описывающих ее уравнений. Результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментальных измерений, произведенных на прецизионном динамическом стенде. Частотная характеристика измерялась для гироскопа на четырехзеркальном кольцевом лазере с неплоским контуром, который работает на He-Ne активной смеси на длине волны 632,8 нм. В исследуемом гироскопе знакопеременная частотная подставка была реализована на основе магнитооптического эффекта Зеемана. Установлена связь между измеренными и расчетными значениями искажений частотной характеристики. Численно получена и экспериментально подтверждена связь искажений частотной характеристики лазерного гироскопа с неравенством интенсивностей полей встречных волн и комплексными коэффициентами связи встречных волн. Результаты исследований позволяют оптимизировать параметры кольцевого лазера с целью повышения точности измерений с помощью лазерных гироскопов.*

**Ключевые слова:** лазерный гироскоп, захват частот встречных волн гироскопа, зеемановская частотная подставка лазерного гироскопа, частотная характеристика лазерного гироскопа.

### Введение

Многие современные автономные навигационные системы высокой точности построены на базе лазерных гироскопов [1–5], обладающих целым рядом достоинств, таких как быстрый старт, малая чувствительность к температурным и механическим воздействиям, цифровой вид выходного сигнала. Точность гироскопа во многом определяется линейностью и стабильностью его частотной характеристики во всем диапазоне измеряемых скоростей. К ее нелинейности приводит обратное рассеяние встречных лучей лазера на зеркалах его резонатора. С обратным рассеянием в резонаторе связано появление зоны захвата в лазерном гироскопе – области скоростей вращения, в которой частота выходного сигнала равна нулю. Исследованию этого явления, а также методам линеаризации частотной характеристики и повышению точности лазерных гироскопов посвящено большое количество публикаций [6–16].

**Азарова** Валентина Васильевна. Кандидат физико-математических наук, доцент, начальник отдела, АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Москва).

**Голяев** Юрий Дмитриевич. Доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник НПК, АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха».

**Кузнецов** Евгений Викторович. Доктор технических наук, директор, АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха».

В работах [8–13] приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных определений вида частотной характеристики лазерных гироскопов с различной формой частотной подставки. Рассматриваются методы измерения коэффициентов связи встречных волн и зависимость нелинейности частотной характеристики от коэффициентов связи. Показано, что корреляцию между нелинейностью частотной характеристики и коэффициентами связи можно получить, учитывая не только модули, но и фазовые соотношения коэффициентов связи, т.е. комплексные величины [8, 12, 13]. Тем не менее это рассматривалось в предположении равенства интенсивностей встречных волн в кольцевом резонаторе лазерного гироскопического датчика, т.е. путем решения только фазового уравнения из полной системы уравнений, описывающих частотную характеристику лазерного гироскопа.

Задача, поставленная в настоящей работе, заключается в изучении частотной характеристики лазерного гироскопа с помощью численного моделирования полной системы описывающих ее уравнений, т.е. с учетом возможного неравенства интенсивностей встречных волн. Полученные результаты расчетов сопоставляются с результатами экспериментальных измерений, проведенных на прецизионном динамическом стенде. Частотная характеристика измеряется для гироскопа на четырехзеркальном кольцевом лазере с неплоским контуром, который работает на He-Ne активной смеси на длине волны 632,8 нм. В исследуемом гироскопе знакопеременная частотная подставка базируется на применении магнитооптического эффекта Зеемана [17]. В работе устанавливается связь между измеренными и расчетными значениями искажений частотной характеристики. Графически выводятся зависимости искажений частотной характеристики лазерного гироскопа, определяемых неравенством интенсивностей полей встречных волн и комплексными коэффициентами связи встречных волн. Результаты исследований позволяют оптимизировать параметры кольцевого лазера с целью повышения точности измерений с помощью лазерных гироскопов.

### Частотная характеристика лазерного гироскопа с учетом связи встречных волн через рассеяние

Для описания частотной характеристики лазерного гироскопа с учетом обратного рассеяния используется следующая система уравнений [7]:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{c}{L} I_1 \left[ \alpha - \beta I_1 - , I_2 - 2r_2 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \cos(\varphi + \varepsilon_2) \right], \quad (1)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{c}{L} I_2 \left[ \alpha - \beta I_2 - , I_1 - 2r_1 \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \cos(\varphi - \varepsilon_1) \right], \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Omega + \frac{c}{L} \left[ r_2 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \sin(\varphi + \varepsilon_2) + r_1 \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \sin(\varphi - \varepsilon_1) \right], \quad (3)$$

где индексы  $(_{1,2})$  представляют собой два противоположных направления распространения встречных волн;  $I_i$  ( $i = 1, 2$ ) – интенсивности встречных волн;  $\alpha, \theta, \beta$  – коэффициенты Лэмба, описывающие атомные переходы;  $r_i$  – коэффициенты связи встречных

волн из-за рассеяния;  $\varphi$  – разность фаз встречных волн;  $\Omega$  – разность собственных частот резонатора для встречных волн;  $\varepsilon_i$  – фазы встречных рассеянных волн.

Из третьего уравнения можно найти зависимость изменения разности фаз встречных волн  $\varphi$  от разности собственных частот резонатора для встречных волн  $\Omega$ . При этом выходной сигнал лазерного гироскопа – сигнал биений – имеет частоту, равную изменению разности фаз встречных волн, деленному на  $2\pi$ .

Для нахождения этой зависимости чаще, как это следует из обзора литературы, предполагается, что  $I_2 = I_1$ , и первые два уравнения отбрасываются. Такой подход был использован и в работах [8, 9], однако полученная таким образом зависимость не всегда полностью описывает частотную характеристику гироскопа.

В работе [7] выведено аналитическое представление уравнения (3), полученное при решении системы уравнений (1–3) с учетом неодинаковых интенсивностей встречных волн. При выводе предполагалось, что модуляции в лучах малы по сравнению со средним значением величины интенсивности, поэтому не учитывались элементы второго порядка малости по модуляции. Предполагалось также, что потери для встречных волн одинаковы. Итоговое уравнение, с учетом того что  $\Omega_g$  есть составляющая разности частот встречных волн, связанная с уровнем накачки, представлено в виде

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Omega \left[ 1 + \frac{S_-^2}{\Omega^2 + \Omega_g^2} \right] - S_+ \sin \varphi - \frac{S_-^2}{\sqrt{\Omega^2 + \Omega_g^2}} \sin 2\varphi, \quad (4)$$

где 
$$S_+ = \frac{c}{L} \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \quad (5)$$

$$S_- = \frac{c}{L} \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}. \quad (6)$$

При этом выражение для  $S_+$  совпадает с выражением, описывающим порог зоны захвата, или, другими словами, определяет связь встречных волн через рассеяние, а искажение частотной характеристики связано не только с амплитудами модуляции интенсивности встречных волн за счет обратного рассеяния при обходе резонатора по и против часовой стрелки  $r_1$  и  $r_2$ , но и с суммарным набегом фаз  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ .

Полученное в работе [7] аналитическое решение фазового уравнения (4) имеет следующий вид:

$$w = \Omega \left[ 1 - \frac{S_+^2}{2\Omega^2} + \frac{S_-^2}{2(\Omega^2 + \Omega_g^2)} \right], \quad (7)$$

где  $w$  – разность частот генерируемых встречных волн лазерного гироскопа.

В лазерных гироскопах для решения проблемы захвата создается разность фаз между встречными волнами с помощью внешнего воздействия. Для этого могут применяться как механические воздействия, когда лазерный гироскоп устанавливается на специальный подвес и вращают из стороны в сторону [10, 11], так и используются магнитооптические эффекты, например эффект Зеемана. В этом случае четырехзеркальному кольцевому резонатору гироскопа придают неплоскую форму, что обеспечивает круговую поляризацию собственных частот излучения во встречных волнах и, соответственно, их чувствительность к магнитному полю. Для создания

магнитного поля каналы резонатора с He-Ne активной смесью помещаются в катушки с током. Чтобы получить знакопеременную подставку, периодически меняется знак тока в катушках [17].

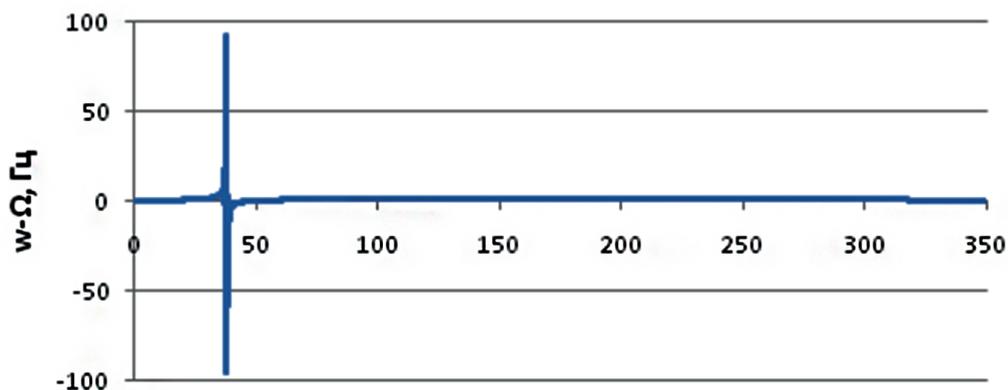
Известно [6–9], что при использовании знакопеременной частотной подставки в форме меандра на частотной характеристике вместо одной зоны захвата около нуля формируется множество динамических зон захвата значительно меньшего размера. Они расположены на частотной характеристике на расстоянии частоты переключения подставки, а их ширина зависит от ширины зоны захвата.

Рассмотрим численное решение уравнения (4) с учетом знакопеременной частотной подставки. Для этого представим

$$\Omega = \Omega + \Omega_n \text{sign}(\sin(2\pi w_n t)), \quad (8)$$

где  $\Omega_n$  – амплитуда прямоугольной знакопеременной частотной подставки, а  $w_n$  – частота ее переключения. Решение будем искать с помощью метода Рунге–Кутты [18].

Частотная характеристика, приведенная на рис. 1, построена по результатам численного решения уравнения (4) с учетом представления (8). Параметры:  $S_+ = 200$  Гц,  $S_- = 800$  Гц,  $\Omega_g = 110$  кГц,  $\Omega_n = 49,3$  кГц,  $w_n = 256$  Гц,  $w$  – разность частот генерируемых встречных волн лазерного гироскопа.



**Разность собственных частот резонатора для встречных волн  $\Omega$ , кГц**

Рис. 1. Частотная характеристика лазерного гироскопа со знакопеременной частотной подставкой прямоугольной формы

Из рисунка видно, что максимальные искажения при использовании прямоугольной знакопеременной подставки возникают в области разности собственных частот резонатора для встречных волн вблизи частоты, равной амплитуде подставки. Ширина максимальной динамической зоны захвата в этой области примерно равна полуширине зоны захвата без применения частотной подставки [8–11]. Для борьбы с этими искажениями используется дополнительный шум, позволяющий сгладить частотную характеристику. В теории за счет подбора амплитуды шумовой составляющей и увеличения времени усреднения можно добиться полного сглаживания динамических зон захвата. Тем не менее в работе [6], а затем и в [7] было показано, что искажения частотной характеристики связаны не только с ширинами динамических зон, но и со смещением их центров, которое невозможно компенсировать путем добавления шумовой составляющей в колебательное движение.

Аналитическое решение фазового уравнения (4) с представлением (8) имеет вид:

$$w = \Omega \left[ 1 + \frac{S_+^2}{2(\Omega^2 - \Omega_n^2)} + \frac{S_-^2 (\Omega_g^2 + \Omega^2 - \Omega_n^2)}{2((\Omega + \Omega_n)^2 + \Omega_g^2)((\Omega - \Omega_n)^2 + \Omega_g^2)} \right]. \quad (9)$$

Рассмотрим предыдущий рисунок в другом масштабе, чтобы оценить изменение частотной характеристики, связанное с параметрами  $S_+$  и  $S_-$ .

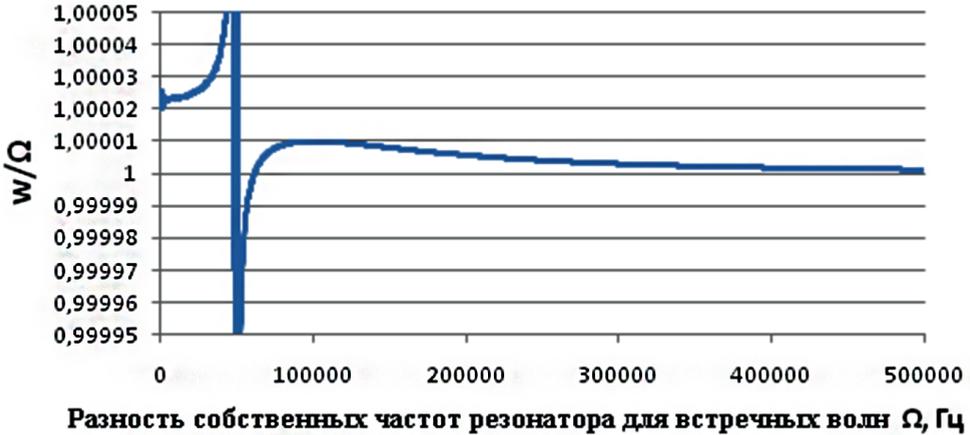


Рис. 2. Вид искажений частотной характеристики лазерного гироскопа со знакопеременной частотной подставкой прямоугольной формы

Для удобства на рис. 2 по оси  $Y$  отложено отношение  $w/\Omega$  – частоты сигнала биений к разности собственных частот резонатора для встречных волн. Единица в этом случае соответствует идеальной частотной характеристике без связи встречных волн. Видно, что даже в случае работы лазерного гироскопа в областях, далеких от амплитуды подставки, частотная характеристика будет отличаться от единицы. При этом величина искажений будет зависеть от параметров, связанных с обратным рассеянием, т.е. будет изменяться при перестройке периметра резонатора (от нагрева или перехода на другую моду).

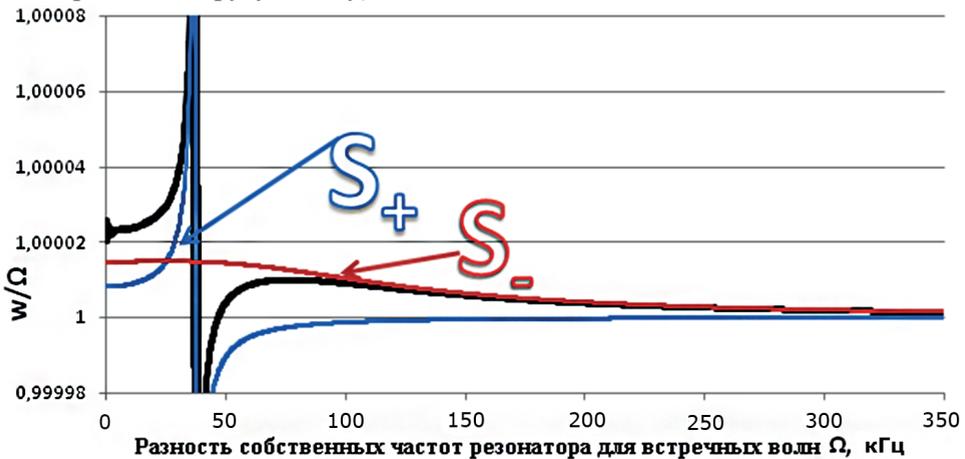


Рис. 3. Вид искажений частотной характеристики лазерного гироскопа, представленной на рис. 2 (черная кривая), и их составляющих ( $S_+$  и  $S_-$ )

Искажения частотной характеристики лазерного гироскопа, представленные на рис. 2, повторены на рис. 3 (кривая черного цвета). Кроме того, на рисунке показаны составляющие этих искажений в виде двух кривых, полученных с учетом параметров  $S_+$  и  $S_-$  путем графического представления решения (9). Кривой  $S_+$  обозначено искажение частотной характеристики, определяемое вторым слагаемым в уравнении (9), а кривая  $S_-$  характеризует поправку, определяемую третьим слагаемым в (9). Таким образом, из рисунка видно, что в искажение частотной характеристики, помимо захвата, вносит вклад и параметр  $S_-$ .

### Описание экспериментов и результаты измерений

Чтобы проверить, адекватны ли практике полученные аналитические зависимости и подтверждаются ли результаты численных расчетов в эксперименте с лазерным гироскопом, были проведены специальные измерения. Для нескольких датчиков типа МТ [17] были исследованы зависимости амплитуды модуляции интенсивности встречных волн от обратного рассеяния и суммарного набега фаз при противофазном ходе пьезозеркал резонатора. При этом экспериментально моделировались возможные режимы работы гироскопа при изменении периметра резонатора путем изменения температуры или перехода с одной продольной моды на другую. В работе [12] представлен метод и описана установка для измерения этих параметров в резонаторе кольцевого лазерного гироскопа.

По полученным зависимостям рассчитывались изменения  $S_+$  и  $S_-$ . Далее на прецизионном поворотном столе измерялись изменения частотной характеристики лазерного гироскопа при противофазном ходе пьезозеркал. Результаты сравнивались с расчетными значениями.

В каждом из исследуемых датчиков измерения проводились для моды с правой круговой поляризацией и для моды с левой круговой поляризацией. Для обеспечения противофазного хода пьезозеркал перед началом измерений на одно из них, а именно на первое в каждом датчике, подавалось постоянное напряжение порядка 150 В. После проведения первого измерения напряжение на втором пьезозеркале увеличивалось на 10 В, а напряжение на первом уменьшалось так, чтобы периметр резонатора оставался постоянным.

Из рис. 4 видно, что диапазон изменений параметров  $r_1$  и  $r_2$  при изменении напряжения на пьезозеркалах от 0 до 140 В для осуществления противофазного хода зеркал не превышает 1,4 ppm, при этом диапазон суммарного набега фаз  $\epsilon_1 + \epsilon_2$  ограничивается  $\pm 4$  рад.

По формулам (5) и (6) рассчитывались изменения параметров  $S_+$  и  $S_-$ . Результаты расчетов представлены на рис. 5.

Из сопоставления расчетных значений параметров  $S_+$  и  $S_-$ , представленных на рис. 5, видно, что изменения значений  $S_-$  примерно в 5 раз превышают диапазон изменений параметра  $S_+$ . Такая зависимость наблюдается для мод с правой и левой круговой поляризацией.

Для моды с правой круговой поляризацией величина  $S_-$  может принимать значения от 100 Гц до 600 Гц в зависимости от перестройки периметра, для моды с левой – от 100 Гц до 500 Гц. Изменение же параметра  $S_+$  колеблется в диапазоне 100÷200 Гц для моды с правой круговой поляризацией и в диапазоне 150÷280 Гц для моды с левой. Другими словами, неравенство интенсивностей встречных волн в кольцевом

резонаторе может привести к существенному искажению его частотной характеристики и, соответственно, к снижению точности лазерного гироскопа.

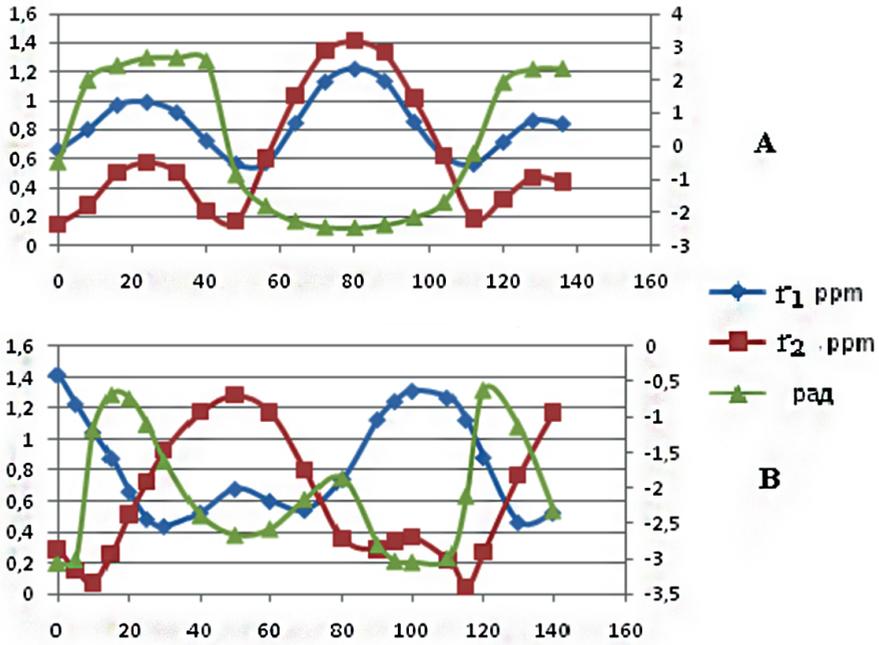


Рис. 4. Изменения амплитуд модуляции интенсивности встречных волн  $r_1$  и  $r_2$  за счет обратного рассеяния (левая шкала) и суммарного набег фаз  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  (правая шкала) для моды с правой (А) и с левой (В) круговой поляризацией при противофазном ходе пьезозеркал в резонаторе

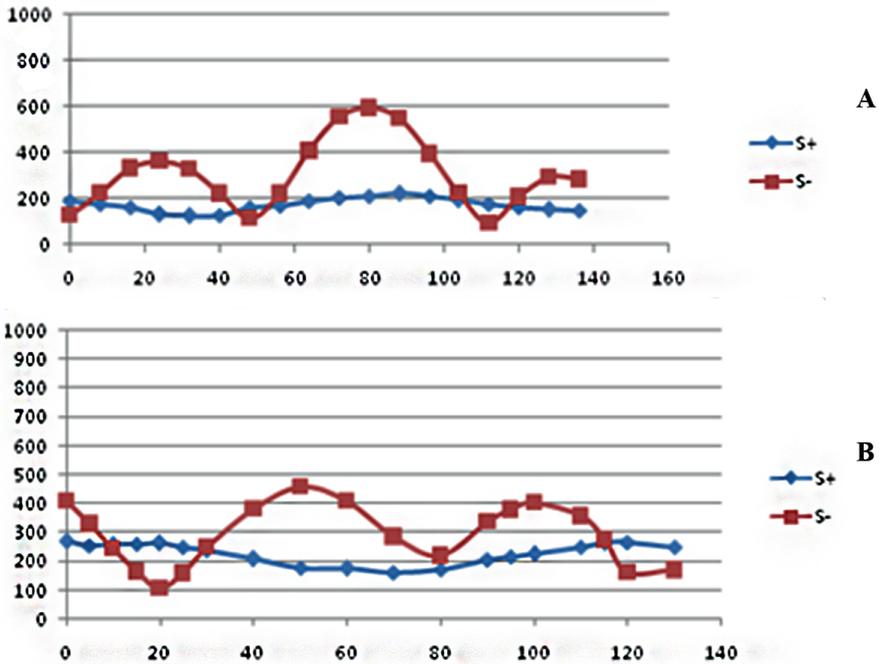


Рис. 5. Зависимость параметров  $S_+$  и  $S_-$  (Гц) от напряжения на пьезозеркалах (В) при противофазном ходе пьезозеркал для моды с правой (А) и с левой (В) круговой поляризацией при противофазном ходе пьезозеркал в резонаторе

Для подтверждения этого предположения были проведены измерения частотной характеристики исследуемого лазерного гироскопа. Результаты измерений сравнивались с расчетными значениями. В экспериментах на поворотном столе измерялась частотная характеристика при разных скоростях вращения. Для каждого положения пьезозеркал частотная характеристика измерялась при следующих скоростях вращения: 6 град/с, 18 град/с, 90 град/с и 400 град/с. При этом амплитуда частотной подставки составляла 42,2 кГц.

На рис. 6 и 7 представлены результаты измерений искажений частотных характеристик для мод с правой и левой круговой поляризацией соответственно.

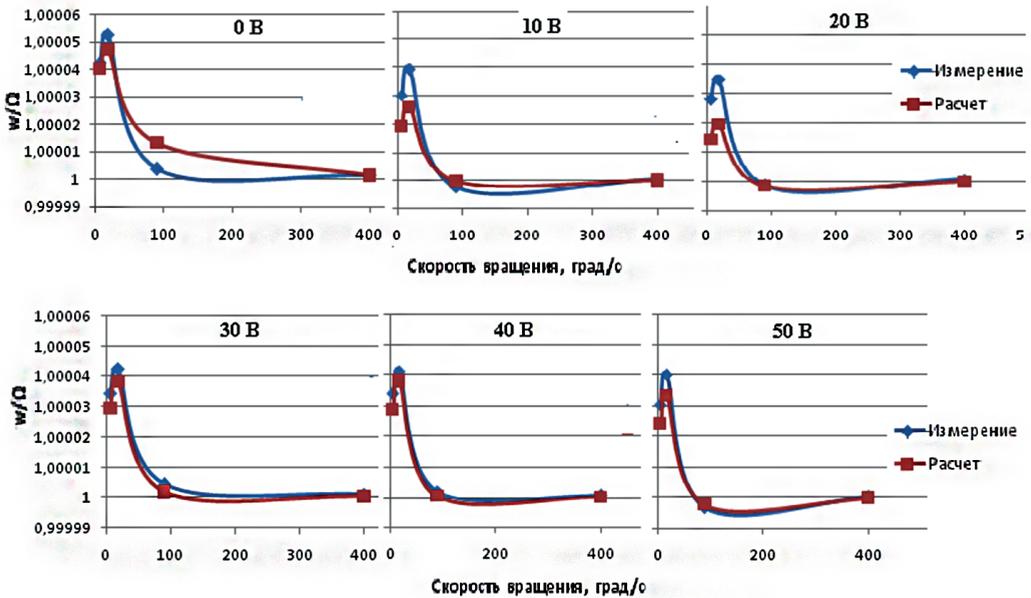


Рис. 6. Результаты измерений нелинейности частотной характеристики от скорости вращения (для моды с правой круговой поляризацией)

Измерения проводились при изменении напряжения на втором пьезозеркале от 0 В до 50 В с шагом 10 В.

Измерения проводились при изменении напряжения на втором пьезозеркале от 0 до 60 В с шагом 10 В.

Из рис. 6 и 7 видно, как изменяется нелинейность частотной характеристики при разных положениях пьезозеркал в резонаторе при четырех разных значениях скорости вращения вблизи значения скорости, соответствующей амплитуде подставки. Видно, что для скоростей вращения меньше амплитуды подставки искажения частотной характеристики меняются в широком диапазоне. Для моды с правой круговой поляризацией отклонение частотной характеристики на скорости 18 град/с меняется от 20 до 50 ppm, для моды с левой – от 38 до 55 ppm. При этом предварительно проведенный анализ параметров  $S_+$  и  $S_-$  позволяет судить о том, в каких диапазонах будет изменяться нелинейность частотной характеристики лазерных гироскопов.

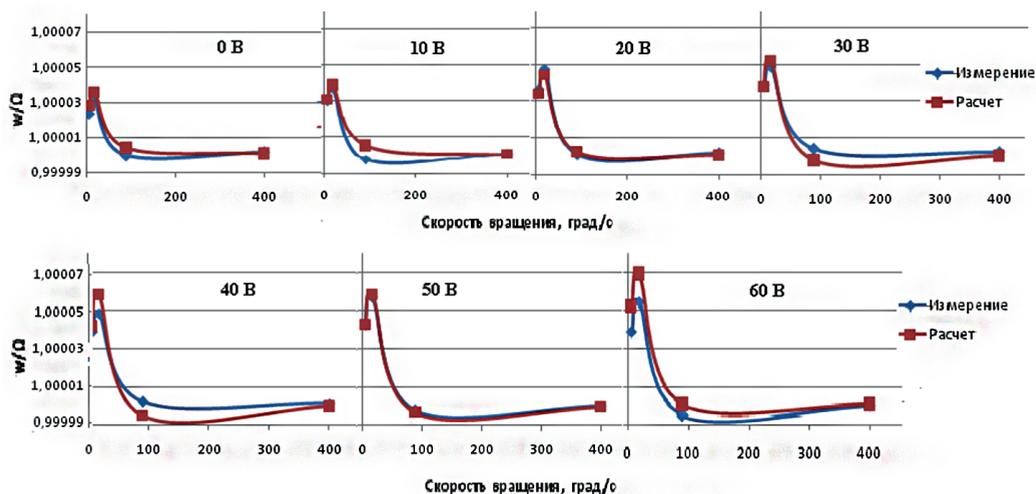


Рис. 7. Результаты измерений нелинейности частотной характеристики от скорости вращения (для моды с левой круговой поляризацией)

## Выводы

В результате проведенного эксперимента установлена связь между измеренными и расчетными значениями искажений частотной характеристики. Численно получена и экспериментально подтверждена количественная зависимость искажений частотной характеристики лазерного гироскопа от неравенства интенсивностей полей встречных волн и комплексных коэффициентов связи встречных волн. Показано, что неравенство интенсивностей встречных волн в кольцевом резонаторе приведет к существенному искажению его частотной характеристики и, соответственно, к снижению точности лазерного гироскопа.

Данные исследования позволяют оптимизировать параметры кольцевого лазера с целью повышения точности измерений с помощью лазерных гироскопов.

Судя по последним публикациям [19–28], задача, поставленная и решаемая в данной работе, является актуальной. Контроль и измерение угловых скоростей навигационными приборами с использованием лазерных гироскопов находит все большее применение.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность А.П. Макееву за помощь в проведении численных расчетов и получении экспериментальных результатов и Е.А. Петрухину за инициирование интереса к проблеме, решаемой в данной работе, а также за полезные обсуждения и помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. №2. С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
2. <http://www.sagem-ds.com>.
3. <http://www.aerospace.honeywell.com/guidance-sensor-inertial-products>.

4. Barbour, N. and Schmidt, G., Inertial Sensor Technology Trends, *Sensors Journal, IEEE*, 2001, 1, 4, pp. 332–339.
5. Wang, S., Zhang, Z., Research on Principle, Application and Development Trend of Laser Gyro, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1549, issue 2, 022118.
6. Найда О.Н., Руденко В.В. Частотные характеристики кольцевого лазера при больших амплитудах периодической частотной подставки // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 7. С. 1308–1314.
7. Aronowitz, F., Optical Gyros and their Applications, *RTO AGARDograph*, 1999, 339, 3-1.
8. Золотоверх И.И., Ларионцев Е.Г. Возможность уменьшения нелинейных искажений частотной характеристики в газовом кольцевом лазере с периодической знакопеременной подставкой // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 5. С. 493–495.
9. Азарова В.В., Макеев А.П., Кузнецов Е.В., Голяев Ю.Д. Частотная характеристика ЛГ в широком диапазоне угловых скоростей вращения // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №2 (101). С. 3–14. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.2.003-014.
10. Алексеев С.Ю., Чиркин М.В., Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Борисов М.В., Молчанов А.В., Захаров М.А. Методика измерения порога синхронизации при изготовлении и эксплуатации прецизионных кольцевых лазеров // Гироскопия и навигация. 2013. № 2. С. 75–83.
11. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. №1. С. 78–88.
12. Бессонов А.С., Макеев А.П., Петрухин Е.А. Измерения комплексных коэффициентов связи в кольцевом резонаторе лазерного гироскопа // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 7. С. 675–682.
13. Бекетов С.А., Бессонов А.С., Петрухин Е.А., Хохлов И.Н., Хохлов Н.И. Влияние обратного рассеяния на нелинейные искажения масштабного коэффициента лазерного гироскопа с прямоугольной подставкой // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 11. С. 1059–1067.
14. Weng, J., Bian, X., Kou, K., Lian, T., Optimization of ring laser gyroscope bias compensation algorithm in variable temperature environment, *Sensors (Switzerland)*, 2020, vol. 20, issue 2, 377.
15. Fang, F., Zeng, W., Li, Z., Coupled dynamic analysis and decoupling optimization method of the laser gyro inertial measurement unit, *Sensors (Switzerland)*, 2020, vol. 20, issue 1, 111.
16. Petrukhin, E.A., Bessonov, A.S., Setup for Measuring Complex Coupling Parameters in Laser Gyro Ring Cavity, *27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2020 – Proceedings*, May 2020, 9133777
17. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеэмановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т.45. №2. С. 171–179.
18. <https://www.wikidata.org/wiki/Q725944#sitelinks-wikipedia>
19. Горшков В.Н., Грушин М.Е., Ларионцев Е.Г., Савельев И.И., Хохлов Н.И. Частотная характеристика кольцевого газового лазера со знакопеременной подставкой при частотной невзаимности, сравнимой с амплитудой подставки // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. №11. С. 1061.
20. Nelson, K.D., Puckett, M.W., Wu, J., A Ring-laser Gyro Based on Stimulated Brillouin Scattering in Silicon Nitride Waveguides, *IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference, RAPID 2020 – Proceedings*, August 2020, 9195706.
21. Li, Q., Li, D., Wang, C., Xiong, C., Yang, C., Study on stability of Ta2O5/Al2O3 laser gyro mirrors exposed in plasma, *Hongwai yu Jiguang Gongcheng/Infrared and Laser Engineering*, 2020, vol. 49, 20200064
22. Bosi, F., Di Virgilio, A.D.V., Giacomelli, U., Simonelli, A., Terreni, G., Basti, A., Beverini, N., Carelli, G., Ciampini, D., Fuso, F., Maccioni, E., Marsili, P., Stefani, F., Small scale ring laser gyroscopes as environmental monitors, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1468, issue 1, 012220.
23. Kuznetsov, E., Golyaev, Y., Kolbas, Y., Kofanov, Y., Kuznetsov, N., Soloveva, T., Kurdybanskaia, A., The method of intelligent computer simulation of laser gyros behavior under vibrations to ensure their reliability and cost-effective development and production, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2020, vol. 11523, 115230B.
24. Tao, Y., Li, S., Fu, Q., Zheng, J., Liu, S., Yuan, Y., A Method for Improving Light Intensity Stability of a Total Reflection Prism Laser Gyro Based on Series Correction and Feedforward Compensation, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, 8957561, pp. 13651–13660.
25. Kuznetsov, E., Kolbas, Y., Kofanov, Y., Kuznetsov, N., Soloveva, T., Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation, *Mechanisms and Machine Science*, 2020, vol. 75, pp. 295–299.

26. Wen, D., Li, D., Zhao, J., Analysis on the Polarization Property of the Eigenmodes in a Nonplanar Ring Resonator, *Appl. Optics*, 2011, 50:18, 3057–3063.
  27. Li, X., Wang, L., Sheng, Q., Prediction of the Random Error of a Laser Gyroscope Using the Modified GM (1, 1) Model, *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 2020, vol. 40, issue 12, 1204001.
  28. Fang, F., Zeng, W., Li, Z., Coupled dynamic analysis and decoupling optimization method of the laser gyro inertial measurement unit, *Sensors (Switzerland)*, 2020, vol. 20, issue 1, 111.
- 

Azarova, V.V., Golyaev, Yu.D., and Kuznetsov, E.V. (Polyus Research Institute named after M.F. Stel'makh, JSC, Moscow)

Effect of Unequal Intensities of Counter-Propagating Waves on the Frequency Response of Laser Gyroscopes, *Гироскопия и Навигация*, 2020, vol. 28, no. 4 (111), pp. 71–81.

**Abstract.** Frequency response of a laser gyroscope was studied by numerical modelling of a complete system of equations describing it. The calculation results are compared to the results of experimental measurements taken on a precision dynamic test bench. The frequency response was measured for a gyroscope based on a four-mirror ring laser with a non-planar contour, operating on He-Ne active mix at the wavelength of 632.8 nm. In the gyroscope under study, the sign-variable dither was implemented on the basis of Zeeman magneto-optical effect. The relationship between the measured and designed values of the frequency response distortions has been found. The relationship between the frequency response distortions in a laser gyroscope and inequality of field intensities of the counter-propagating waves (CPW) has been numerically calculated and confirmed by experiments. Based on the research results, the parameters of a ring laser can be optimized to improve the accuracy of measurements by means of laser gyroscopes.

**Key words:** laser gyroscope, lock-in of gyro counter-propagating waves, Zeeman dither of laser gyro, frequency response of laser gyro.

Материал поступил 20.08.2020