

В. В. АЗАРОВА, А. П. МАКЕЕВ, Е. В. КУЗНЕЦОВ, Ю. Д. ГОЛЯЕВ

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Изучена частотная характеристика лазерного гироскопа путем численного моделирования с использованием фазового уравнения. Результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментальных измерений на прецизионном динамическом стенде. Установлена количественная связь между пороговой величиной статической зоны захвата и искажениями частотной характеристики. Численными методами получена и экспериментально подтверждена количественная зависимость искажений частотной характеристики от амплитуды и частоты подставки в форме меандра. Показано, что форма частотной подставки оказывает существенное влияние на вид частотной характеристики. Кроме того продемонстрировано, что искажения частотной характеристики зависят от условий ее измерения, в частности времени. Проведенные исследования позволяют оптимизировать параметры частотной подставки с целью повышения точности измерений с помощью лазерных гироскопов.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, захват частот встречных волн гироскопа, частотная подставка лазерного гироскопа, нелинейность частотной характеристики гироскопа.

Введение

Лазерные гироскопы представляют значительный интерес благодаря широкому спектру применений в различных областях науки и техники [1–3]. Одним из основных свойств гироскопа является способность измерять углы поворота и угловые скорости вращения. Очевидно, что степень точности измерения для различных скоростей вращения – одна из ключевых характеристик гироскопа, и ее исследование – актуальная задача. Подобная проблема ранее рассматривалась в ряде работ, и были выявлены некоторые закономерности выходного сигнала гироскопа при изменении величины измеряемой скорости вращения [4–10]. Тем не менее, эти исследования носили приближенный характер в силу сложности прямого аналитического решения уравнения лазерного гироскопа и отсутствия высокоточных динамических стендов для экспериментальных измерений. В последний период

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

Макеев Алексей Петрович. Соискатель, ведущий инженер-программист, АО НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха.

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

Голяев Юрий Дмитриевич. Кандидат физико-математических наук, главный конструктор лазерной гироскопии, начальник НИК, АО НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров и высокоточных динамических стендов появились возможности прямого решения уравнения лазерного гироскопа методами численного моделирования и проведения с хорошей точностью экспериментальных измерений выходных частотных характеристик лазерных гироскопов в широком диапазоне угловых скоростей вращения.

Численное моделирование

Динамика одномодового (двухволнового) лазерного гироскопа с He-Ne газовой смесью описывается системой трех дифференциальных уравнений первого порядка – системой укороченных уравнений для медленно меняющихся интенсивностей и разности фаз встречно распространяющихся волн [5]. Эти уравнения связаны, но при определенных допущениях, в частности при пренебрежении незначительной амплитудной модуляцией интенсивностей, позволительно считать фазовое уравнение независимым. Такое допущение вводится даже в том случае, когда знакопеременная подставка рассматриваемого лазерного гироскопа имеет значительную амплитуду. В данной работе фазовое уравнение рассматривается как независимое:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \Omega + F(\Omega_{\Pi}, w_{\Pi}, t) + \Omega_L \sin \Phi = \nu, \quad (1)$$

где Ω – частота невзаимности резонатора, пропорциональная угловой скорости вращения кольцевого лазера; Ω_L – порог зоны захвата; F – функция формы подставки, зависящая от амплитуды подставки Ω_{Π} и частоты переключения подставки w_{Π} .

При использовании любой периодической частотной подставки фазовое уравнение есть нелинейное уравнение первого порядка, правая часть которого периодична как по времени, так и относительно искомой функции Φ . Для численного решения данного дифференциального уравнения использовался метод Рунге–Кутты. Уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$\Phi' = f(t, \Phi). \quad (2)$$

В качестве начальных условий примем: $\Phi_0 = 0$, $t_0 = 0$. Ω , Ω_{Π} , w_{Π} , Ω_L – константы. Приближенное значение в последующих точках будет вычисляться по формуле

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (3)$$

где

$$k_1 = dt \cdot f(t_n, \Phi_n), \quad (4)$$

$$k_2 = dt \cdot f\left(t_n + \frac{dt}{2}, \Phi_n + \frac{k_1}{2}\right), \quad (5)$$

$$k_3 = dt \cdot f\left(t_n + \frac{dt}{2}, \Phi_n + \frac{k_2}{2}\right), \quad (6)$$

$$k_4 = dt \cdot f(t_n + dt, \Phi_n + k_3). \quad (7)$$

Шаг интегрирования составлял $dt = 10^{-7}$ с. Когда t становится больше $3/w_n$ (время трех полных периодов подставки), в формуле (1) значение Ω увеличивается на 10 Гц, начальные условия выбираются $\Phi_0 = \Phi_n$, $t_0 = t_n$ и вычисления повторяются. На каждом шаге частота биений вычислялась по формуле

$$\nu_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi_n - \Phi_0}{t_n - t_0} \quad (8)$$

где Φ_n – набег фазы для трех периодов подставки, Φ_0 – набег фазы на предыдущем шаге, $t_n - t_0$ – три периода подставки. Таким способом строится частотная характеристика кольцевого лазера от $\Omega_{\text{начальная}}$ до $\Omega_{\text{конечная}}$.

Экспериментальные исследования частотной характеристики лазерных гироскопов

Экспериментальные исследования частотной характеристики, ширин статических и динамических зон захвата в настоящей работе проводились на зеемановских лазерных гироскопах (ЗЛК) [11]. В кольцевом лазере, на активную газовую He-Ne-среду которого наложено продольное магнитное поле, генерация осуществлялась на длине волны 632,8 нм на одной продольной моде. Из-за неплоского контура кольцевого резонатора, который используется в лазерах данного типа, встречные волны имеют круговую поляризацию. Пороговые значения статических зон захвата измерялись методом, при котором минимизировано влияние взаимодействия излучения с поверхностями зеркал [12]. При использовании в кольцевом лазере знакопеременной частотной подставки прямоугольной формы ширина динамических зон достигает максимума вблизи амплитуды подставки [8, 9, 13]. В настоящей работе подробно изучались особенности частотной характеристики кольцевого лазера, в частности, вблизи амплитуды подставки. Исследовалась связь ширин динамических зон с величиной порога захвата, амплитудой и частотой переключения подставки, а также зависимость их величин от условий измерений. Измерения проводились с помощью высокоточного поворотного стола фирмы Acuitas AG, Швейцария. Диапазон измеряемых скоростей

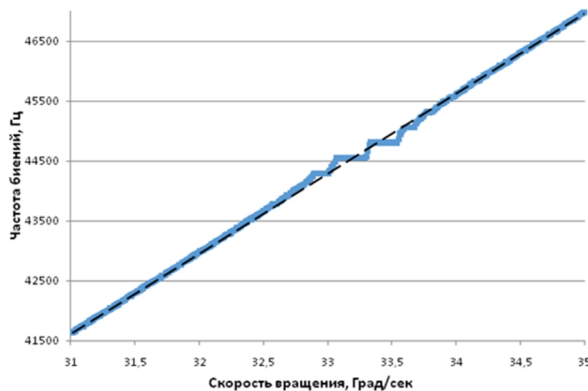


Рис. 1. Частотная характеристика кольцевого лазера для скоростей вращения, близких к амплитуде подставки. Пунктирной линией обозначена идеальная частотная характеристика

стола – 15000 град/с со стабильностью не хуже $5 \cdot 10^{-6}$ от измеряемой скорости. При измерениях стол разгонялся с ускорением 100 град/с² до скорости, на 2 град/с меньшей амплитуды подставки. Далее скорость поворота стола плавно, с хорошей линейностью, с ускорением 0,01 град/с² увеличивалась до значения, на 2 град/с превышающего скорость, соответствующую амплитуде подставки. За время измерений стол успевал совершить шесть полных оборо-

тов. Показания кольцевого лазера считывались с усреднением 0,25 с. Таким способом снималась частотная характеристика кольцевого лазера вблизи амплитуды подставки, показанная на рис. 1.

В поставленном эксперименте лазер находился более 5 с в широких динамических зонах, и было отмечено, что при использовании знакопеременной частотной подставки в кольцевом лазере также наблюдается инерционный гистерезисный эффект, а именно: при прохождении динамической зоны на половине периода подставки кольцевой лазер работает в режиме синхронизации, что приводит к увеличению динамических зон. Это проявляется в том, что вход и выход из зоны чувствительности не симметричны относительно линии идеальной частотной характеристики. Для исследования влияния эффекта инерционности измерения частотной характеристики проводились в два этапа. На первом этапе измерений прописывалась частотная характеристика при увеличении скорости вращения поворотного стола. На втором этапе скорость стола уменьшалась. В обоих случаях стол вращался в одну и ту же сторону, а его скорость изменялась линейно с одинаковым ускорением $0,01 \text{ град/с}^2$. В результате прописывался вход в динамическую зону с обеих сторон как при увеличении частоты биений, так и при ее уменьшении, что продемонстрировано на рис. 2. Диапазон измеряемых скоростей – 31-35 град/с, увеличение и уменьшение скорости (верхняя и нижняя кривые рис. 2 соответственно) проходило с постоянным ускорением $0,01 \text{ град/с}^2$. Размах отклонений вблизи частоты подставки приблизительно равен величине зоны статического захвата, что подтверждается значениями, приведенными в таблице. Из таблицы видно, что пороговые значения статических зон захвата четырех последовательных измеренных аксиальных мод резонатора сравнимы с отклонениями частотной характеристики от идеальной вблизи амплитуды подставки на соответствующих модах генерации.

Т а б л и ц а

Напряжение на пьезокерамиках кольцевого лазера, В	Пороговое значение статической зоны захвата, Ω_L , Гц	Отклонения частотной характеристики от идеальной, Гц
12	268	276
30	450	416
47	266	250
63	271	257

По оси ординат на рис. 2 отложена разность измеренной частоты биений встречных волн и частоты, соответствующей скорости вращения (1). Ширина зоны захвата для данной моды $\Omega_L = 270 \text{ Гц}$. Амплитуда подставки составляла 44490 Гц, частота переключения подставки – 256 Гц. Из полученных экспериментальных данных следует, что отклонение от идеальной частотной характеристики при приближении к частоте подставки меньше, чем при выходе, т.е. удалении от нее. Это можно объяснить только явлением инерционного взаимодействия излучения с поверхностями зеркал и соответствующим изменением их рассеивающих свойств.

Были также проведены измерения искажений частотных характеристик при изменении частоты переключения частотной подставки. Экспериментальные результаты приведены на рис. 3.

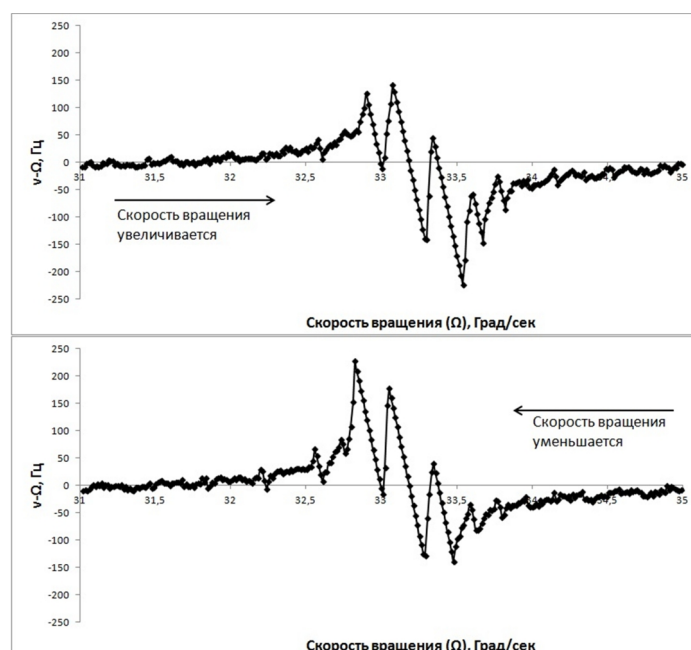


Рис. 2. Вид частотной характеристики кольцевого лазера (эксперимент) для скоростей вращения, близких к амплитуде подставки. Стрелками показаны увеличение и уменьшение скорости при входе в зону чувствительности

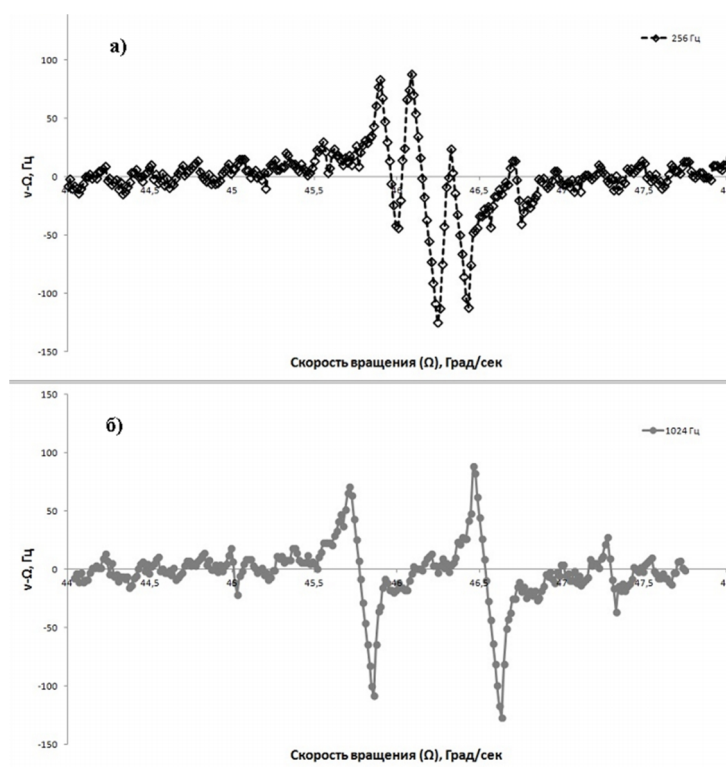


Рис. 3. Сравнение экспериментальной частотной характеристики кольцевого лазера при разных значениях частоты переключения подставки, порог захвата $\Omega_L = 180$ Гц: а) пунктиром обозначены результаты для подставки, амплитуда которой равна 61775 Гц, частота переключения – 256 Гц; б) сплошной линией обозначены результаты для подставки, амплитуда которой равна 61318 Гц, частота переключения – 1024 Гц. Скорость вращения в обоих случаях увеличивалась

Анализируя экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, можно сделать следующие выводы:

- расстояние между динамическими зонами равно частоте переключения подставки;
- максимальное отклонение частотной характеристики вблизи амплитуды подставки в обоих случаях практически одинаково и приблизительно равно пороговому значению захвата Ω_L ;
- величина области повышенной чувствительности вблизи значения амплитуды подставки не зависит от частоты переключения подставки.

Кроме того, был проведен целый ряд экспериментальных измерений искажения частотных характеристик кольцевых лазеров с неплоским контуром с периметрами 16 и 20 см (ЗЛК-16 и ЗЛК-20 соответственно). Измерения осуществлялись при разных значениях амплитуды подставки и частоты ее переключения. Используемое оборудование позволяло задавать частоту переключения подставки либо 256 Гц, либо 1024 Гц. Для изменения амплитуды подставки в катушку невзаимного устройства впаивалось дополнительное сопротивление. После включения каждый кольцевой лазер прогревался в течение часа. Измерения проводились на четырех соседних модах. Для измерения порога зоны захвата частотная подставка выключалась, и катушка невзаимного устройства подключалась к генератору сигналов специальной формы. Результаты, полученные на кольцевом лазере с 16-сантиметровым периметром резонатора, приведены на рис. 4, причем оба для одной и той же моды с порогом захвата $\Omega_L = 135$ Гц. Амплитуда подставки изменялась. На рис. 4, а она равна 62007 Гц, а на рис. 4, б – 10238 Гц. В каждом случае частота переключения равна 256 Гц, скорость вращения увеличивалась.

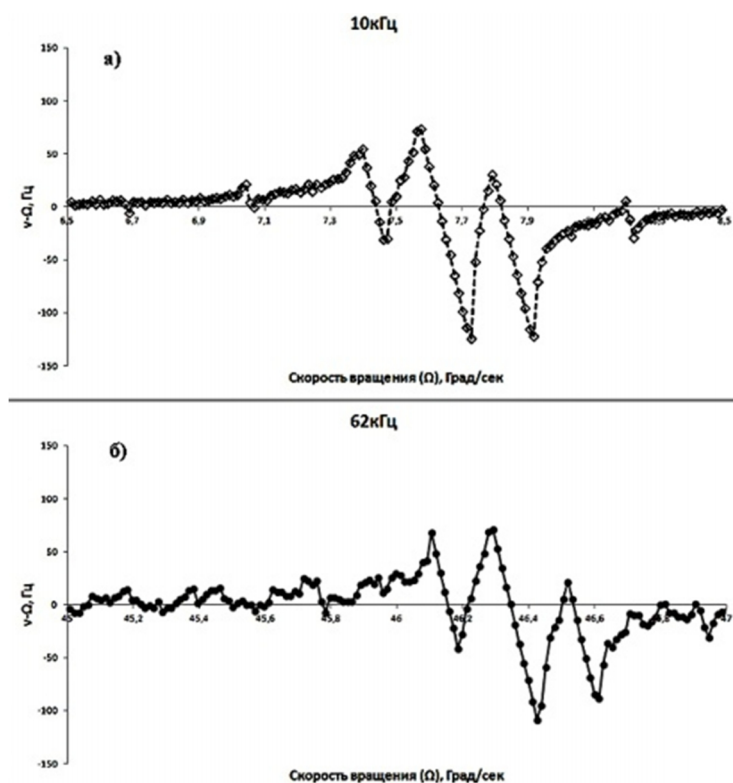
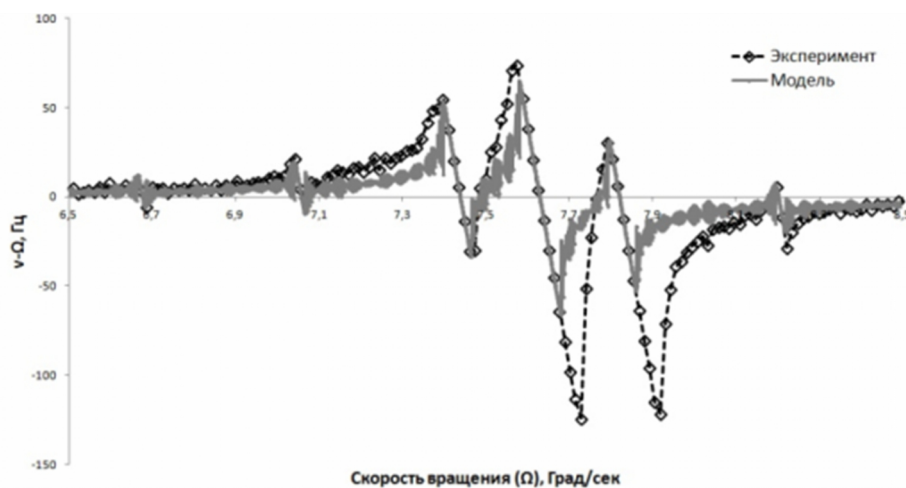


Рис. 4. Вид частотной характеристики кольцевого лазера при разных значениях амплитуды подставки. Эксперимент

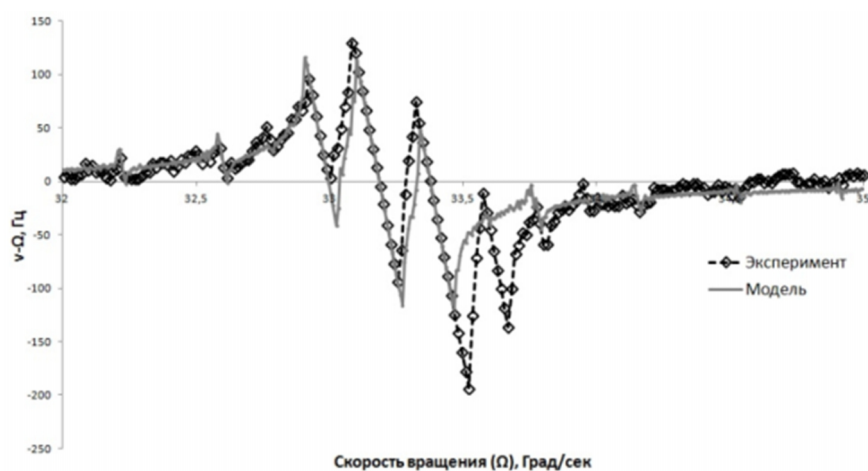
Проанализировав полученные экспериментальные данные, авторы пришли к выводу, что максимальное отклонение частотной характеристики при входе в зону повышенной чувствительности определяется пороговым значением захвата на данной моде и не зависит ни от амплитуды, ни от частоты переключения подставки. Но при длительном (более 1 с) нахождении в динамических зонах захвата величина искажений увеличивается. Результаты, приведенные в качестве примера на рис. 4, подтверждают эти выводы.

Сопоставление экспериментальных данных и результатов численного моделирования

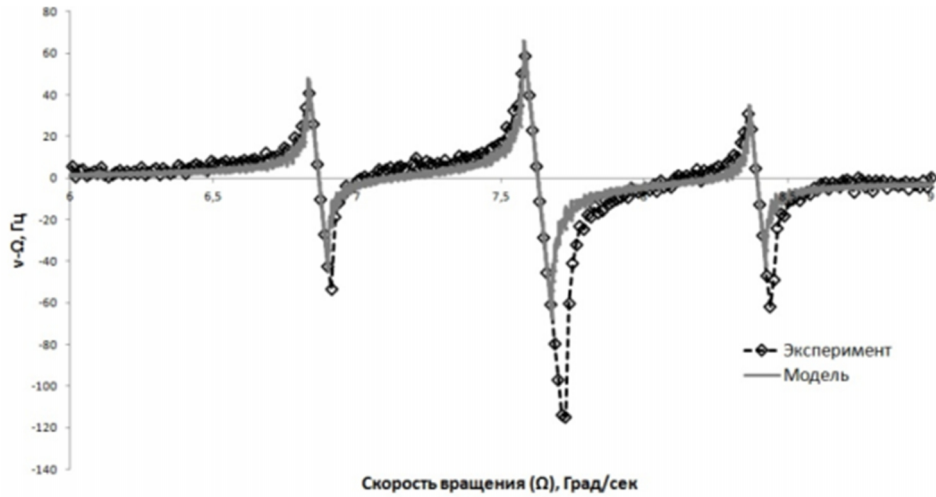
В качестве примера сопоставления результатов измерений и расчетов на рис. 5 приведены данные искажений частотных характеристик кольцевых лазеров при скоростях вращения, близких к соответствующим амплитудам подставки. Видно, что расчетные значения достаточно точно соответствуют значениям, полученным экспериментально. Отличия можно объяснить инерционностью взаимодействия излучения с поверхностями зеркал, которое не учитывается в модели расчета.



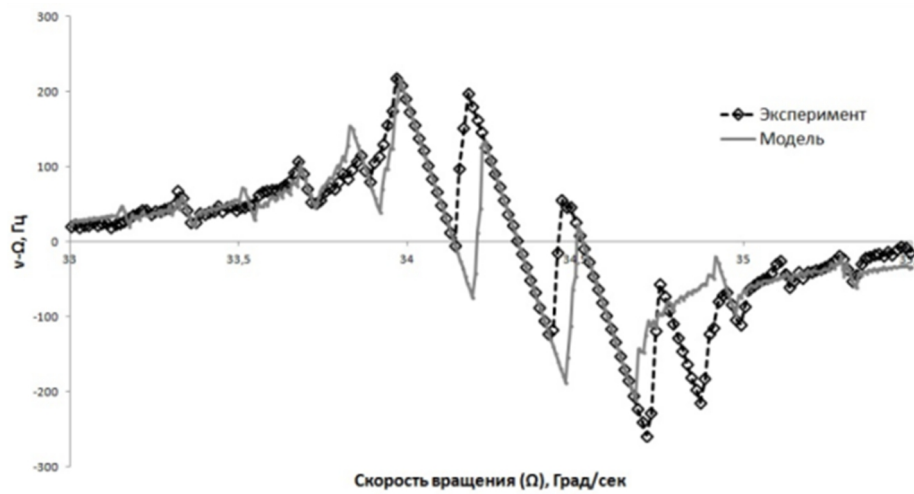
а)



б)



б)



в)

Рис. 5. Вид частотных характеристик кольцевого лазера при разных значениях амплитуды подставки, частоты переключения подставки и порогового значения зоны захвата.

Сравнение результатов экспериментальных измерений и численных расчетов со значениями параметров:

- а) $\Omega_L = 135$ Гц, $\Omega_{\Pi} = 10238$ Гц, $w_{\Pi} = 256$ Гц;
- б) $\Omega_L = 266$ Гц, $\Omega_{\Pi} = 44550$ Гц, $w_{\Pi} = 256$ Гц;
- в) $\Omega_L = 135$ Гц, $\Omega_{\Pi} = 10200$ Гц, $w_{\Pi} = 1024$ Гц;
- г) $\Omega_L = 450$ Гц, $\Omega_{\Pi} = 46015$ Гц, $w_{\Pi} = 256$ Гц

Таким образом, искажения частотной характеристики описываются и с достаточной степенью достоверности определяются тремя параметрами: порогом захвата, амплитудой и частотой переключения частотной подставки с учетом ее формы. При длительных временных периодах измерений и продолжительной работе лазера в динамической зоне (1 с и более) проявляется эффект инерционного взаимодействия излучения лазера с поверхностями зеркал, известный в литературе как эффект «впечатывания решетки» [14]. В результате происходит изменение измеряемых величин динамических зон.

Оптимизация формы частотной подставки путем численного моделирования

На рис. 6 представлены результаты, полученные путем решения дифференциального уравнения (1) с параметрами расчетов: амплитуда подставки $\Omega_{\Pi} = 44490$ Гц; частота переключения подставки $w_{\Pi} = 256$ Гц; порог захвата $\Omega_L = 270$ Гц. Формы подставки:

а) треугольник $F(t) = \frac{8\Omega_{\Pi}}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin kw_{\Pi}t}{k^2}$, где $k = 1, 3, 5, \dots$;

б) меандр $\Omega_{\Pi}(t) = \Omega_{\Pi} \text{sign}(\sin w_{\Pi}t)$;

с) синус $\Omega_{\Pi}(t) = \Omega_{\Pi} (\sin w_{\Pi}t)$.

На рис. 7 показаны результаты численного моделирования частотных характеристик для двух видов знакопеременной магнитооптической подставки. На рис. 7, а представлен график для меандра с параметрами $\Omega_{\Pi} = 44490$ Гц, $w_{\Pi} = 256$ Гц, а на рис. 7, б – для комбинированной подставки, состоящей из быстрого и медленного меандров со следующими параметрами: для быстрого – те же, что и на рис. 6, а для медленного – $\Omega_{\Pi}(\text{медл}) = 154$ Гц; $w_{\Pi}(\text{медл}) = 4$ Гц. Результаты численного моделирования, приведенные на рис. 6 и 7, получены при $\Omega_L = 270$ Гц.

Сравнивая результаты расчетов, видим, что использование дополнительно медленного меандра привело к уменьшению искажений частотной характеристики вблизи частоты подставки до двух раз, или, другими словами, динамические зоны захвата оказываются более узкими в случае комбинированной подставки.

Таким образом, анализ результатов численного моделирования, представленных на рис. 6 и 7, позволяет сделать выводы, что путем выбора оптимальной формы, амплитуды и частоты переключения подставки можно добиться минимального искажения частотной выходной характеристики лазерного гироскопа при одной и той же величине статической зоны захвата в заданном диапазоне скоростей вращения разрабатываемого устройства.

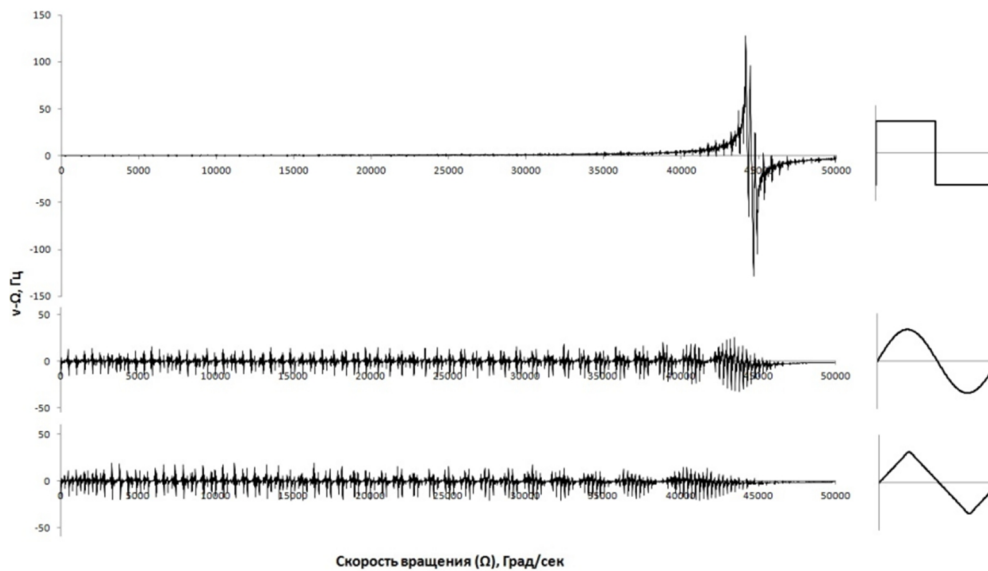


Рис. 6. Результаты численного моделирования искажения частотных характеристик кольцевого лазера в широком диапазоне скоростей вращения с различными формами частотной подставки

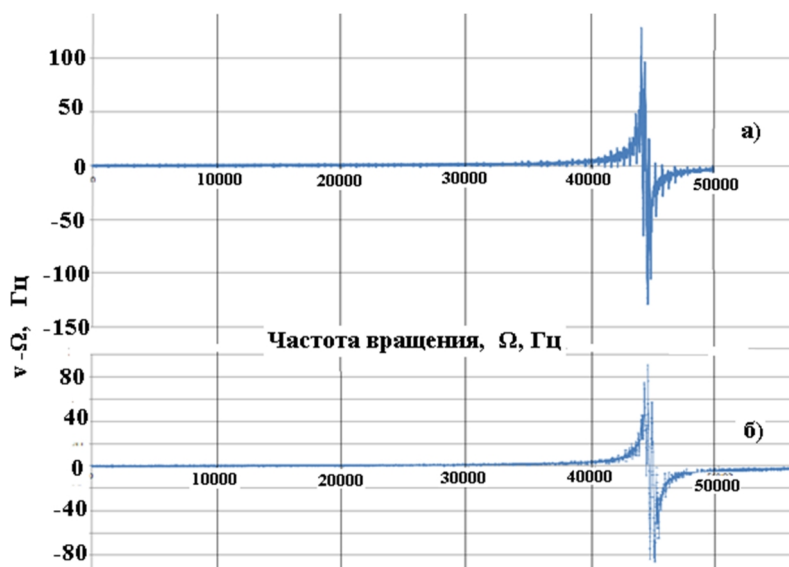


Рис. 7. Частотные характеристики для прямоугольной (а) и комбинированной подставки, состоящей из быстрого и медленного меандров (б)

Заключение

Представленные результаты численного моделирования и экспериментальных измерений показали, что частотную характеристику кольцевого лазерного гироскопа со знакопеременной частотной подставкой можно анализировать с большой достоверностью, используя только фазовое уравнение.

При работе кольцевого лазера в динамической зоне проявляется эффект «впечатывания», что приводит к увеличению динамических зон захвата.

Максимальное искажение частотной характеристики при использовании знакопеременной частотной подставки прямоугольной формы определяется параметрами резонатора кольцевого лазера и не зависит от амплитуды и частоты переключения подставки. Максимальная ширина динамической зоны захвата при этом практически равна ширине статической зоны захвата.

С помощью численного моделирования показано, что использование комбинации двух прямоугольных подставок разной частоты и амплитуды (частота переключения «медленной» подставки составляет 4 Гц, амплитуда равна половине частоты переключения «быстрой» подставки) приводит к уменьшению динамических зон захвата.

Проведенные исследования могут быть использованы для оптимизации частотной подставки с целью получения минимальных искажений частотной характеристики лазерного гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.aerospace.honeywell.com/guidance-sensor-inertial-products>.
2. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1 (72). С. 3.
3. <http://www.sagem-ds.com>.
4. Курятов В.Н., Ланда П.С., Ларионцев Е.Г. Частотная характеристика кольцевого лазера на колеблющейся подставке // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1968. Т.11. С. 1839.
5. Aronowitz, F., Collins, R.J., Lock-in and intensity-phase interaction in the ring laser, *J. Appl. Phys.*, 1970, 41, pp. 130–141.

6. **Хошев И.М.** Частотная характеристика кольцевого лазера с комбинированной частотной подставкой // Радиотехника и электроника. 1979. № 6. С. 1142–1151.
7. **Wilkinson, G.R.**, Ring lasers, *Prog. Quantum Electron*, 1987, 11, pp. 1–17.
8. **Найда О.Н., Руденко В.В.** Частотные характеристики кольцевого лазера при больших амплитудах периодической частотной подставки // Электронная техника. Серия 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1990. Вып. 1 (53). С. 83–90.
9. **Назаренко М. М., Савельев И.И., Скулаченко С.С., Хромых А.М., Юдин И.И.** Взаимодействие мод с ортогональными круговыми поляризациями в кольцевом зеемановском лазере // Квантовая электроника. 1979. С. 1698–1704. [Sov J Quantum Electron, 9:8 (1979), 1000–1004].
10. **Wen, D., Li, D., Zhao, J.**, Analysis on the Polarization Property of the Eigenmodes in a Non-planar Ring Resonator, *Appl. Optics*, 50:18 (2011), 3057–3063.
11. **Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И.** Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. С. 171.
12. **Азарова В.В., Бессонов А.С., Макеев А.П., Петрухин Е.А.** Установка для измерения порога захвата в Зеемановском кольцевом лазере. Патент № 138509, 2013.
13. **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.
14. **Зборовский В.А., Куликов В.Н., Переверзев А.В., Цигуро Н.Г., Шокин Б.А.** Влияние взаимодействия излучения с веществом отражателей на характеристики кольцевого лазера // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 3. С. 521–525.

Azarova V.V., Makeev A.P., Kuznetsov E.V., and Golyaev Yu.D. (Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, JSC, Moscow).

Frequency Response of Laser Gyroscopes in a Wide Range of Rotation Velocities. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2018. Vol. 26. No. 2 (101). P. 3–14.

Abstract. The laser gyro frequency response is studied by means of numerical simulation using a phase equation. The calculation results are compared to the results of experimental measurements on a precision dynamic test-bench. Quantitative relationship between the threshold value of static lock-in zone and frequency response distortions is established. Numerical methods helped to obtain and experimentally confirm the quantitative dependence of frequency response distortion on the amplitude and frequency of meander-shaped biasing. It is shown that the biasing shape significantly affects the frequency response form. Furthermore, it is demonstrated that frequency-response distortions depend on conditions of its measurement, in particular, on the time. The conducted research allows biasing parameters to be optimized with a view to increase the accuracy of measurements using laser gyroscopes.

Key words: laser gyro, lock-in of frequencies of gyro opposing waves, laser gyro biasing, nonlinearity of gyro frequency response.

REFERENCES

1. <http://www.aerospace.honeywell.com/guidance-sensor-inertial-products>.
2. **Peshekhonov, V.G.**, Gyroscopic Navigation Systems: Current Status and Prospects, *Gyroscopy and Navigation*, 2011, 2:111.
3. <http://www.sagem-ds.com>.
4. **Kuryatov, V.N., Landa, P.S., and Lariontsev, E.G.**, Frequency Characteristics of a Ring Laser on an Oscillating Support, *Izvestiya vuzov, Ser. Radiofizika*, 1968, vol. 11, p. 1839.
5. **Aronowitz, F., Collins, R.J.**, Lock-in and Intensity-Phase Interaction in the Ring Laser, *J. Appl. Phys.*, 1970, 41, pp. 130–141.

6. **Khoshev, I.M.**, Frequency Response of Ring Laser with Combined Frequency Biasing, *Radio-tekhnika i elektronika*, 1979, no. 6, pp. 1142–1151.
7. **Wilkinson, G.R.**, Ring Lasers, *Prog. Quantum Electron*, 1987, 11, pp. 1–17.
8. **Naida, O.N., and Rudenko, V.V.**, Frequency Characteristics of a Ring Laser with a Large-Amplitude Periodic Frequency Offset, *Elektronnaya tekhnika, Seriya 11, Lazernaya Tekhnika i Optoelektronika*, 1990, no. 1 (53), pp. 83–90.
9. **Nazarenko, M.M., Savel'ev, I.I., Skulachenko, S.S., Khromykh, A.M., and Yudin, I.I.**, Interaction of Modes with Orthogonal Circular Polarizations in Zeeman's Ring Laser, *Kvantovaya elektronika*, 1979, pp. 1698–1704. [Sov J Quantum Electron, 9:8 (1979), 1000–1004].
10. **Wen, D., Li, D., and Zhao, J.**, Analysis on the Polarization Property of the Eigenmodes in a Nonplanar Ring Resonator, *Appl. Optics*, 50:18 (2011), 3057–3063.
11. **Azarova, V.V., Golyaev, Yu.D., and Savel'ev, I.I.**, Zeeman Laser Gyros, *Kvantovaya elektronika*, 2015, vol. 45, p. 171.
12. **Azarova, V.V., Bessonov, A.S., Makeev, A.P., and Petrukhin, E.A.**, Zeeman Ring Laser Lock-in Threshold Measurement Unit, RF Patent no. 138509, 2013.
13. **Gorshkov, V.N., Grushin, M.E., Lariontsev, E.G., Savel'ev, I.I., and Khokhlov, N.I.**, Frequency Response of Ring Gas Laser with Alternating-Sign Biasing at Frequency Nonreciprocity Comparable to the Biasing Amplitude, *Kvantovaya elektronika*, 2016, vol. 46, no. 11, p. 1061.
14. **Zborovskii, V.A., Kulikov, V.N., Pereverzev, A.V., Tsiguro, N.G., and Shokin, B.A.**, Effect of Interaction between Radiation and Reflector Substance on Ring Laser Performance, *Kvantovaya elektronika*, 1978, vol. 5, no. 3, pp. 521–525.

Материал поступил 19.09.2017