

УДК 004.94; 681.787

ВИРТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРАХ

**А.С. Бессонов^{1,@},
Е.А. Петрухин²**

¹*МИРЭА - Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

²*АО «Серпуховский завод «Металлист», Серпухов 142200, Россия*

[@]*Автор для переписки, e-mail: didugan4@mail.ru*

В статье рассмотрено моделирование обратного рассеяния света в кольцевых лазерах. Показано, что обратное рассеяние является основным источником погрешностей лазерного гироскопа. Дано математическое описание процессов обратного рассеяния, основанное на определении комплексных коэффициентов связи встречных волн в кольцевом лазере. Предлагается представление комплексных коэффициентов связи в виде векторных диаграмм. Сделан вывод, что наиболее удобными для пользователей являются виртуальные модели, которые создаются в средах графического программирования. Эти модели объединяют информацию, содержащуюся в математических моделях и в векторных диаграммах. При помощи компьютерной анимации отображено изменение фаз комплексных коэффициентов связи встречных волн во время работы кольцевого лазера. Результаты моделирования представлены в различных текстовых и графических формах. Описаны результаты моделирования обратного рассеяния при перестройке лазера на генерацию различных мод, при температурном воздействии и при противофазном ходе пьезоэлектрических корректоров. Созданные виртуальные модели предназначены для разработчиков измерительных систем, используемых на производстве кольцевых лазеров и лазерных гироскопов. Полученные результаты позволяют оценить пороги захвата и измерительные сигналы, разработать алгоритмы и программные модули обработки данных для измерительных систем.

Ключевые слова: кольцевой лазер, обратное рассеяние света, порог захвата, виртуальная модель, математическая модель, векторная диаграмма.

VIRTUAL MODELS OF LIGHT BACKSCATTERING IN RING LASERS

**A.S. Bessonov^{1,@},
E.A. Petrukhin²**

¹*MIREA - Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

²*JSC «Serpukhov plant «Metallist», Serpukhov 142200, Russia*

[@]*Corresponding author e-mail: didugan4@mail.ru*

The simulation of light backscattering in a ring laser is considered. It is indicated that backscattering is the main source of laser gyro errors. A mathematical description of the backscattering processes based on the determination of the complex coupling parameters of counterpropagating waves is presented. A representation of complex coupling parameters in the form of vector diagrams is proposed. It is concluded that virtual models created in graphical programming environments are most convenient for users. These models combine information contained in mathematical models and in vector diagrams. With the help of computer animation, the complex coupling parameters phase changes of counterpropagating waves during the operation of the ring laser are displayed. The simulation results are presented in various text and graphic forms. The backscattering simulation results during the laser tuning to the generation of various modes, under the influence of temperature and in the antiphase motion of piezoelectric transducers are described. The created virtual models are intended for developers of measuring systems used in the production of ring lasers and laser gyros. The obtained results allow estimating the lock.

Keywords: ring laser, light backscattering, lock-in threshold, virtual model, mathematical model, vector diagram.

Введение

Лазерные гироскопы, строящиеся на основе гелий-неоновых кольцевых лазеров (КЛ), уже в течение нескольких десятков лет применяются в составе навигационных систем самолетов, морских судов и иных подвижных объектов. Однако всем лазерным гироскопам присущ недостаток, связанный с обратным рассеянием (ОР) света на шероховатостях и неоднородностях зеркал. Это явление приводит к возникновению существенной погрешности измерений, поскольку оно вызывает синхронизацию встречных световых волн, приводящую к нелинейным искажениям частотной характеристики и появлению зоны нечувствительности гироскопа к малым частотам вращения. В этой зоне, называемой зоной захвата, частота биений встречных волн КЛ становится равной нулю, и датчик теряет работоспособность. Указанным проблемам уделяется значительное внимание в фундаментальных трудах по лазерной гироскопии [1, 2], в учебниках и учебных пособиях (например, в [3]) и в многочисленных статьях (например, в [4–6]). В литературе приводятся математическое описание ОР, методы его уменьшения.

В процессе производства КЛ величины ОР и порогов захвата, ограничивающих зону захвата, обязательно измеряют и контролируют, для чего разрабатываются новые методы и средства измерений [7–9]. Трудностью измерений ОР и порога захвата является непостоянство измеряемых величин, которые изменяются при функционировании КЛ, а также при воздействии внешних факторов. Поэтому в процессе разработки соответствующих измерительных систем (ИС) требуется проведение научных исследований и компьютерного моделирования. Необходимо создание модели объекта измерения (ОИ), удовлетворяющей определенным требованиям [10]. Модель ОИ должна достаточно полно отражать процессы ОР, а также быть понятной разработчику средств измерений. Кроме того, реализация модели на компьютере должна быть не слишком трудоемкой и не требовать значительных вычислительных ресурсов.

Использование технологии виртуальных приборов (ТВП) дает разработчику единые инструменты для компьютерного моделирования, проведения физического эксперимента, разработки прикладного программного обеспечения и его интеграции с аппаратными средствами, что значительно повышает эффективность проектирования ИС [11]. Поэтому актуальными оказываются компьютерные модели ОР, создаваемые с помощью ТВП и называемые виртуальными моделями (ВМ). Рассматриваемые в статье ВМ ОР позволяют изучить процессы, происходящие в ОИ, наглядно их представить и смоделировать измерительные сигналы, обработка которых прикладной программой приведет к определению результатов измерений.

1. Математические модели обратного рассеяния в кольцевом лазере

Разработке любой компьютерной модели предшествует создание математической модели. Описание эффектов, связанных с влиянием ОР при работе КЛ в режиме слабой связи встречных волн, осуществляется с использованием системы дифференциальных уравнений [1, 2]. В них влияние ОР описывается с помощью комплексных коэффициентов связи (ККС), определяющих, какая часть светового излучения рассеивается во встречном направлении.

При разработке математических моделей ОР исходят из предположения, что угловые и линейные перемещения оптической оси КР, ввиду их малости, не изменяют величины ККС отдельных зеркал, называемых парциальными ККС [12]. В этом случае суммарные ККС \tilde{r}_{cw} и \tilde{r}_{ccw} можно представить следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{cw} &= \sum_n r_n^{cw} \exp[i(\varphi_n^{cw} + 2kl_n)] \\ \tilde{r}_{ccw} &= \sum_n r_n^{ccw} \exp[i(\varphi_n^{ccw} - 2kl_n)] \end{aligned} \quad (1)$$

где индексы *cw* и *ccw* означают направления распространения света по и против часовой стрелки, соответственно;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число;

r_n и φ_n – модуль и фазовый сдвиг *n*-ого источника ОР;

l_n – его продольная координата относительно оптической оси резонатора.

Для наиболее распространенного четырехзеркального КР индекс *n* изменяется от 1 до 4.

При таком подходе процессы, происходящие в КР на стадиях контроля, испытаний или штатного функционирования, могут быть описаны с помощью достаточно простого математического аппарата, основанного на задании закона изменения координат $l_n(t)$ источников ОР в модельном времени *t* (1).

Значения ККС (1) определяют пороги захвата Ω_L [1]:

$$\Omega_L = \frac{c}{2\pi L} \sqrt{r_{cw}^2 + r_{ccw}^2 + 2r_{cw}r_{ccw} \cos(\varphi_{cw} + \varphi_{ccw})}, \quad (2)$$

где Ω_L – порог захвата в герцах;

c – скорость света;

L – периметр КЛ.

В соответствии с данной формулой изменения ККС приводит к изменению порога захвата.

Рассмотрим один из вариантов математической модели (1), в которой уточняется, что каждый из парциальных рассеивателей имеет консервативную \tilde{R}_n и диссипативную \tilde{r}_n составляющие [12, 13].

Пусть КР соответствует четырехзеркальной оптической схеме, изображенной на рис. 1. Настройка на резонанс здесь осуществляется с помощью пьезоэлектрических корректоров (ПЭК), установленных на зеркалах M_1 и M_3 . Зеркала M_2 и M_4 в резонаторе неподвижны.

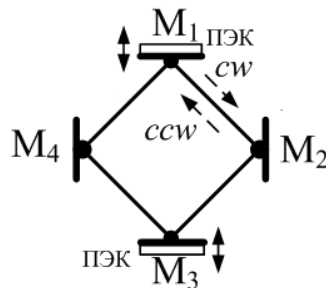


Рис. 1. Оптическая схема кольцевого резонатора:
 M_1, M_2, M_3, M_4 – зеркала, ПЭК – пьезоэлектрический корректор.

В данном варианте модели суммарные КС определяются следующим образом:

$$\tilde{r}_{cw,ccw}(t) = \sum_{n=1}^4 \left[\left(R_n \exp\left(\frac{i\pi}{2} \pm i\gamma_n\right) + r_n \exp(i\pi \pm i\zeta_n \pm i\gamma_n) \right) \exp(\pm i\Delta\varphi_n(t)) \right], \quad (3)$$

- где R_n и r_n – модули консервативной и диссипативной частей n -ого рассеивателя;
 - ζ_n – сдвиг фаз между ними;
 - γ_n – сдвиги фаз, определяющие положение консервативной части рассеивателя с номером n по отношению к оптической оси резонатора;
 - $\Delta\varphi_n(t) = 2 \cdot k \cdot \Delta l_n(t)$ – изменения сдвигов фаз в плечах резонатора в модельном времени;
 - $\Delta l_n(t)$ – изменения продольных координат источников ОР.
- Сдвиги фаз удобно представить в виде вектора следующего вида:

$$\Delta\vec{\varphi}(t) = \{\Delta\varphi_1(t), \Delta\varphi_2(t), \Delta\varphi_3(t), \Delta\varphi_4(t)\}. \quad (4)$$

С помощью модели (3) можно описать процессы ОР света в КЛ, протекающие в ходе измерений. Для разработки ИС, предназначенной для контроля КЛ и измерения порога захвата, актуально моделирование переходов ОИ от генерации одной моды к другой, процессов теплового расширения резонатора и так называемый противофазный ход, когда зеркала M_1 и M_3 движутся в разных направлениях по отношению к центру резонатора так, что его периметр L остается постоянным. Противофазный ход применяется в измерениях для определения максимального и минимального порогов захвата [13].

Рассмотрим модель, отражающую перестройку зеэмановского КЛ [14] с межмодовым расстоянием $\frac{c}{2L}$ на различные моды. Задачей моделирования является оценка порогов захвата $\Omega_L^{(m)}$, где m – индекс моды, который изменяется от 1 до 4 [14].

Будем считать, что в начале моделирования КЛ генерирует моду 1, и из этого состояния происходит переход к моде с индексами 2, 3 или 4, при котором ПЭК двигают зеркала M_1 и M_3 *одновременно и в одном направлении*, то есть друг к другу или друг от друга (рис. 1). Поскольку при переходе к соседней моде периметр L зеemanовского КЛ изменяется на $\lambda/2$, то длина каждой из плеч резонатора в наиболее простом случае меняется на $\lambda/8$. Если проводить отсчет фазовых сдвигов от источника ОР, расположенного на зеркале M_1 , то переход к модам с индексами 2, 3 или 4 описывается следующим вектором сдвига фаз:

$$\Delta\bar{\varphi}^{(m)} = \left\{ 0, (m-1)\frac{\pi}{2}, (m-1)\pi, -(m-1)\frac{\pi}{2} \right\}, \quad (5)$$

где m – индекс моды.

Полученные фазовые сдвиги подставляют для расчета КС в выражение (3), а затем по формуле (2) рассчитывают искомые пороги захвата $\Omega_L^{(m)}$.

С целью упрощения рассмотренных моделей может быть введено понятие частичного вклада $\tilde{\Omega}_n^m$ в порог захвата от каждого из зеркал [12]. Тогда формула (1) переписывается так:

$$\Omega_L^{(m)} = \left| \sum_{n=1}^4 \tilde{\Omega}_n^{(m)} \right| = \left| \sum_{n=1}^4 \tilde{\Omega}_n^{(1)} \cdot \exp(i\Delta\varphi_n^{(m)}) \right|. \quad (6)$$

Вектор изменения фазовых сдвигов $\Delta\varphi(t)$ может быть представлен в виде суммы двух составляющих:

- вектора изменения фазовых сдвигов $\Delta\varphi_T$, происходящих за счет изменения температуры по сравнению с некоторым начальным ее значением;
- вектора изменения фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{\text{ПФХ}}$, происходящих за счет изменения управляющего напряжения на ПЭК по сравнению с некоторым начальным его значением.

Изменение температуры приводит к расширению или сжатию корпуса резонатора, которое сопровождается изменением периметра ΔL_T . В случае линейного приближения можно записать:

$$\Delta L_T = k_T \cdot L \cdot \Delta T, \quad (7)$$

где k_T – коэффициент температурного расширения материала корпуса резонатора.

Равномерное изменение периметра в одинаковой мере распределяется по плечам резонатора, изменение длин которых составит величину $\frac{\Delta L_T}{4}$. Тогда благодаря автоматической регулировке периметра КЛ изменения сдвига фаз не произойдет, и порог захвата останется неизменным на всех модах световой генерации. Однако на практике такое равномерное распределение не наблюдается, поскольку реальные ПЭК перемещают зеркала неодинаково. Это можно смоделировать с помощью использования коэффициента неравномерности перемещения пьезозеркал:

$$\Delta l = p \Delta L_T / 4,$$

здесь значение $p \leq 1$.

Последнее выражение следует ввести в вектор изменения фазовых сдвигов

$$\Delta\bar{\Phi}_T(t) = \left\{ 0, \frac{p\pi\Delta L_T(t)}{\lambda}, 0, -\frac{p\pi\Delta L_T(t)}{\lambda} \right\}. \quad (8)$$

В соответствии с (6) и (8) порог захвата изменяется периодически. Кроме того, из приведенных выражений видно, что при реализации модели в виде компьютерной программы изменение периметра ΔL удобно выражать в единицах длины волны λ .

Выражение для изменения фазовых сдвигов при моделировании противофазного хода оказывается схожим с (8), а именно:

$$\Delta\bar{\Phi}_{\text{пфх}}(t) = \left\{ 0, \frac{4\pi\Delta l(t)}{\lambda}, 0, -\frac{4\pi\Delta l(t)}{\lambda} \right\}, \quad (9)$$

где Δl – изменение длины в плече резонатора.

Таким образом, в данном разделе статьи нами описаны достаточно простые математические модели ОИ, позволяющие оценивать изменения порогов захвата при переходе на другую моду (3) и (5), изменении температуры (6) и (8) и противофазном ходе на выбранной моде световой генерации (6) и (9). Задача проектируемой измерительной системы будет заключаться в выделении максимального $\Omega_{L_{\max}}$ и минимального порогов захвата $\Omega_{L_{\min}}$.

Следует также заметить, что при расположении ПЭК на соседних зеркалах математическое описание процессов ОР будет иметь отличия. Например, в этом случае вектор $\Delta\bar{\Phi}_T(t)$ имеет ненулевые компоненты без введения коэффициента неравномерности:

$$\Delta\bar{\Phi}_T(t) = \left\{ 0, -\frac{\pi\Delta L_T(t)}{\lambda}, -\frac{\pi\Delta L_T(t)}{\lambda}, 0 \right\}.$$

2. Векторные диаграммы

Применение векторных диаграмм позволяет более наглядно, чем в математических моделях, отобразить процессы ОР света в КЛ, что и способствует более глубокому их пониманию разработчиками ИС [1, 2, 12, 13]. ККС удобно представляется в виде вектора на комплексной плоскости, длина которого соответствует модулю коэффициента связи, а угол поворота вектора по отношению к положительному направлению горизонтальной оси – сдвигу фаз. Происходящие во время математического моделирования изменения углов векторов легко анимируются с помощью компьютерных технологий. Рассмотрим примеры векторных диаграмм, соответствующих выше описанным математическим моделям, при этом вектор ККС или парциального порога захвата, соответствующий зеркалу M_1 , будем считать неподвижным, чтобы от него отсчитывать положения других векторов

Перестройку КЛ с генерации первой моды на генерацию второй моды иллюстрирует векторная диаграмма (рис. 2). На рис. 2а показано исходное расположение векторов парциального порога захвата. При перестройке на вторую моду вектор ОР \vec{r}_1 (см. выше)

фиксируется неподвижным, вектор \vec{r}_2 поворачивается на угол $\pi/2$, вектор \vec{r}_3 – на угол π , вектор \vec{r}_4 – на угол $-\pi/2$ ((3) и (5)). В результате видно, что вторая мода характеризуется другим порогом захвата: $\Omega_L^{(2)} > \Omega_L^{(1)}$.

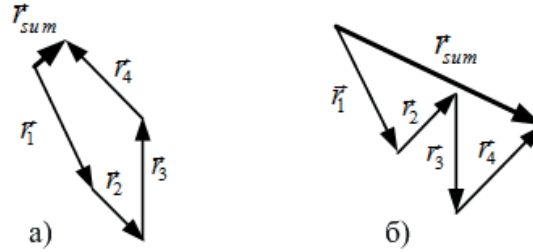


Рис. 2. Векторные диаграммы при генерации первой (а) и второй (б) мод.

Векторная диаграмма на рис. 3 поясняет процессы ОР, происходящие при противофазном ходе ПЭК (8). Векторы ОР \vec{r}_1 и \vec{r}_3 , соответствующие подвижным зеркалам с ПЭК, не изменяются, а векторы, \vec{r}_2 и \vec{r}_4 , соответствующие неподвижным зеркалам – вращаются, описывая своими концами окружности. Суммарный вектор ОР \vec{r}_{sum} определяет порог захвата (2), из чего можно утверждать, что порог захвата будет периодически изменяться в диапазоне от Ω_{Lmin} до Ω_{Lmax} .

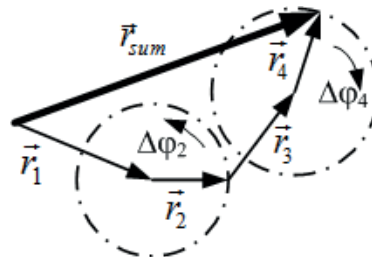


Рис. 3. Векторная диаграмма противофазного хода пьезоэлектрических корректоров.

Аналогичная векторная диаграмма может быть построена и при моделировании температурных воздействий (8).

3. Виртуальные модели

Технология виртуальных приборов (ТВП) и среда графического программирования LabVIEW предоставляет разработчикам эффективные инструменты компьютерного моделирования, автоматизации научных исследований и эксперимента и создания прикладного программного обеспечения различного рода измерительных, управляющих и информационных систем [11, 15]. Высокая эффективность ТВП известна и общепризнанна [11, 15], поэтому ниже рассматриваются только наиболее актуальные особенности виртуальных моделей, используемых при создании ИС и, в частности, систем контроля КЛ.

Как было показано в первом разделе статьи, моделирование ОР связано с созданием математических, графических и алгоритмических моделей, отражающих происходящие в ОИ процессы. ВМ здесь может и должна играть интегрирующую роль, собирая информацию от других моделей и сохраняя их преимущества (рис. 4). Математическая часть ВМ реализуется с помощью обширных библиотек готовых функций,

имеющихся в составе LabVIEW, алгоритмическая часть – соответствующими структурами графического программирования, графическая часть – за счет разнообразных средств отображения текстовой и графической информации на лицевой панели, в том числе с анимационными эффектами. Отметим, что процесс создания ВМ технологичен и отличается сравнительно низкой трудоемкостью.

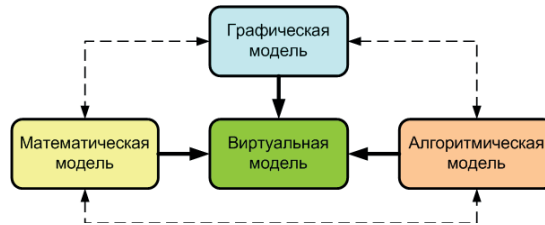


Рис. 4. Интегрирующая роль виртуальной модели.

При разработке виртуальной модели ОР КЛ с неплоским контуром использовались сменные экранные страницы (рис. 5). Первая экранная страница (рис. 5а) предназначена для ввода исходных данных и расчета на основе выражений (3), (2) и (5) суммарных ККС и порогов захвата при генерации различных мод. На второй экранной странице (рис. 5б) отображаются разноцветные векторные диаграммы, для чего используются графические экраны *Graph XY*. Рядом указывается соответствующий порог захвата $\Omega_L^{(m)}$. Следует указать, что на рис. 5 векторные диаграммы приведены в разном масштабе.

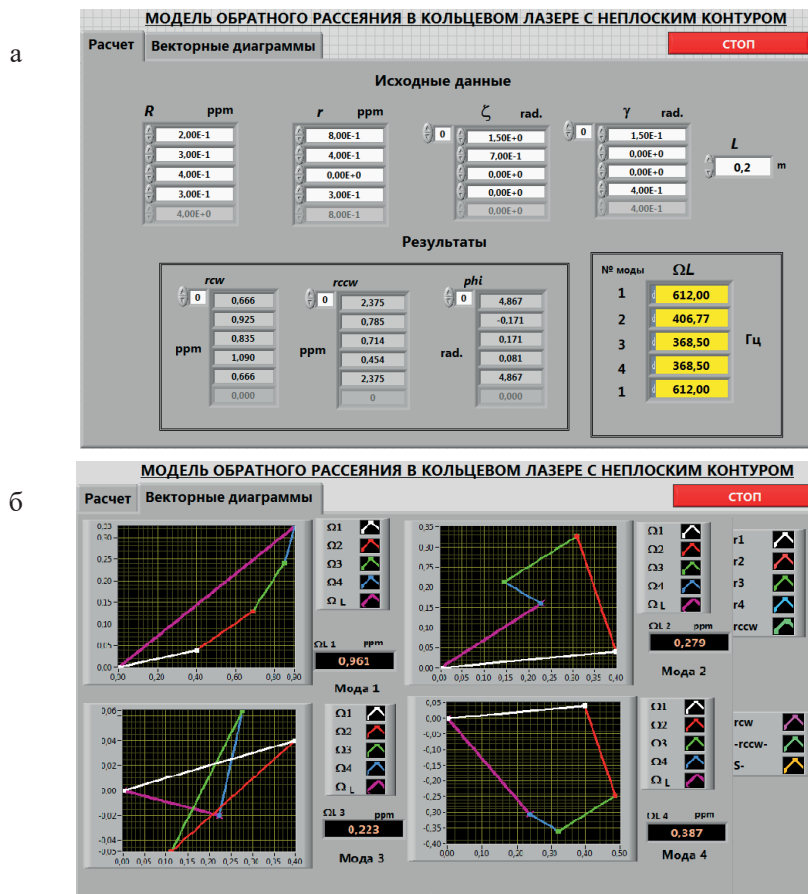


Рис. 5. Лицевая панель виртуальной модели обратного рассеяния кольцевого лазера: а) экранная страница ввода исходных данных и расчета ККС и порогов захвата; б) экранная страница векторных диаграмм.

Другие разработанные нами ВМ предназначены для изучения температурного воздействия на резонатор и противофазного хода пьезозеркал в соответствии с выражениями (9) и (8). Моделирование происходит с анимацией движения векторов ОР, вызванного изменением периметра фазовых сдвигов в плечах резонаторов. Перемещения векторов можно наблюдать и изучать на графических экранах, аналогичных приведенным на рис. 5б. В результате такого моделирования формируются измерительные сигналы, отличающиеся друг от друга при работе КЛ на различных модах.

По измерительным сигналам рассчитывают пороги захвата $\Omega_L^{(m)}(t)$ и находят их искомые максимальное и минимальное значения. Из рис. 6 следует, что зависимости $\Omega_L^{(m)}(t)$ имеют периодический вид. При некоторых значениях исходных данных можно наблюдать дополнительные точки перегиба или локальные максимумы и минимумы. Эти факты в дальнейшем учитываются в процессе разработки программных модулей обработки данных, входящих в состав программного обеспечения ИС.

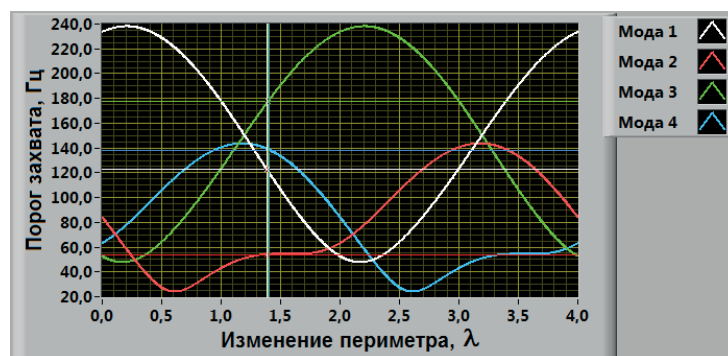


Рис. 6. Результаты моделирования зависимости порога захвата кольцевого лазера от изменения периметра вследствие влияния температуры (коэффициент неравномерности $p = 0.5$).

Сходные зависимости получаются и при моделировании противофазного хода ПЭК, что позволяет оценить максимальный и минимальный пороги захвата при генерации лазером различных мод.

Описанные в статье модели опробованы в эксперименте. В наших публикациях [12, 13] приведены сведения об используемых аппаратных средствах ИС, методиках обработки измерительных сигналов, процедурах параметрической идентификации моделей, а также проанализированы полученные экспериментальные результаты.

Заключение

Измерение комплексных коэффициентов связи и оценка порогов захвата позволяет отбраковывать резонаторы на ранних этапах производства кольцевых лазеров, за счет чего снижается себестоимость и повышается процент выхода годных изделий. Решающие эти задачи измерительные системы разрабатываются в настоящее время с помощью методов модельного проектирования и с использованием технологий виртуальных приборов. Значительную роль здесь играют частные модели объектов измерений, отражающие лишь изучаемые свойства КЛ.

В статье рассмотрены наиболее простые модели обратного рассеяния света в КЛ. Однако они могут быть усложнены. Так, например, ОР вызывают не только зеркала, но и

другие элементы резонатора КЛ, а также внешний фотоприемник. Если их вклад значителен, то они также должны быть представлены в моделях.

Разработанные измерительные системы прошли апробацию и могут быть внедрены в производстве.

Литература:

1. Aronowitz F. Fundamentals of the Ring Laser Gyro. Optical Gyros and their Application. RTO AGARDograph 339, 1999. P. 3-1 to 3-45.
2. Wilkinson J. R. Ring Lasers // Progress Quantum Electronics. 1987. № 11. P. 1–103.
3. Панов М.Ф., Соломонов А.В., Филатов Ю.В. Физические основы интегральной оптики. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 432 с.
4. Krenz G., Bux S. I., Slama S., Zimmerman C., Courteille P.W. Controlling mode locking in optical ring cavities // Appl. Phys. B. 2007. V. 87. P. 643–647.
5. Судаков В.Ф. Асимптотический метод построения динамической частотной характеристики лазерного гироскопа // Квантовая электроника. 2016. Т. 46(10). С. 675–682.
6. Федоров А.Е., Зборовский В.А., Рекунов Д.А., Курылев А.Н. Цифровой лазерный гироскоп с системой минимизации зоны захвата // Материалы XXIV Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 349–355.
7. Zhenfang Fan, Hui Luo, Guangfeng Lu, Shaomin Hu. Online effective backscattering estimation for ring laser gyro // Chinese Optics Lett. 2012. № 10(5). P. 051404-1–051404-3.
8. Nasibov H., Mamedbeili I., Riza D., Balaban E., Hacizade F. High-precision measurements of reflectance, transmittance, and scattering at 632.8 nm // Proc. of SPIE. 2016. V. 8433. P. 843313-1–843313-8.
9. Mazule L., Liukaityte S., Eckardt R. C., Melninkaitis A., Balachninaite O., Sirutkaitis V. A system for measuring surface roughness by total integrated scattering // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 1–9.
10. Ефремов А.А., Сорокин С.С., Зенков С.М. Модельно-ориентированное проектирование – международный стандарт инженерных разработок [Электронный ресурс]. URL: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2040-43%20Sorokin.pdf> (дата обращения: 04.05.2018).
11. Conway J., Watts St. A Software Engineering Approach to LabVIEW. Prentice Hall PTR, 2003. 222 p.
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. Петрухин Е.А. Прогнозирование порога захвата в кольцевом резонаторе лазерного гироскопа // Материалы XXIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 83–88.
14. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т. 45 (2). С. 171–179.
15. Баран Е.Д. LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые, измерительные и управляющие системы. М.: ДМК Пресс, 2009. 448 с.

References:

1. Aronowitz F. Fundamentals of the Ring Laser Gyro. Optical Gyros and their Application. RTO AGARDograph 339, 1999. P. 3-1 to 3-45.
2. Wilkinson J. R. Ring Lasers // Progress Quantum Electronics. 1987. № 11. P. 1–103.
3. Panov M.F., Solomonov A.V., Filatov Yu.V. Physical fundamentals of integrated optics. Moscow: Publishing Center «Academy», 2010. 432 p. (in Russ.).
4. Krenz G., Bux S. I., Slama S., Zimmerman C., Courteille P.W. Controlling mode locking in optical ring cavities // Appl. Phys. B. 2007. V. 87. P. 643–647.
5. Sudakov V.F. Asymptotic method for constructing a dynamic frequency response of a laser gyro // Quantum Electronics. 2016. V. 46(10). P. 961–965.
6. Fedorov A.E., Zborovsky V.A., Rekunov D.A., Kurylev A.N. Digital laser gyroscope with lock-in minimisation system// Proceedings of 23th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2017. P. 463–468.
7. Zhenfang Fan, Hui Luo, Guangfeng Lu, Shaomin Hu. Online effective backscattering estimation for ring laser gyro // Chinese Optics Lett. 2012. № 10(5). P. 051404-1–051404-3.
8. Nasibov H., Mamedbeili I., Riza D., Balaban E., Hacizade F. High-precision measurements of reflectance, transmittance, and scattering at 632.8 nm // Proc. of SPIE. 2016. V. 8433. P. 843313-1–843313-8.
9. Mazule L., Liukaityte S., Eckardt R. C., Melninkaitis A., Balachninaite O., Sirutkaitis V. A system for measuring surface roughness by total integrated scattering // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 1–9.
10. Efremov A.A., Sorokin S.S., Zenkov S.M. Model-based design – the international standard of engineering developments [Electronic resource]. URL: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2040-43%20Sorokin.pdf>. (in Russ).
11. Conway J., Watts St. A Software Engineering Approach to LabVIEW. Prentice Hall PTR, 2003. 222 p.
12. Bessonov A.S., Makeev A.P., Petrukhin E.A. Measurements of complex coupling coefficients in a ring resonator of a laser gyroscope // Quantum Electronics. 2017. V. 47(7). P. 675–682.
13. Petrukhin E.A. Prediction of the lock-in threshold value in a ring cavity of a laser gyro // Proceed. of 23th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2016. P. 103-107.
14. Azarova V.V., Golyaev Yu.D., Savelyev I.I. Zeeman laser gyroscopes // Quantum Electronics. 2015. V. 45(2). P. 171–179.
15. Baran E.D., LabVIEW FPGA. Reconfigurable, measuring and control systems, Moscow: DMK Press, 2009. 448 p. (in Russ).

Об авторах:

Бессонов Алексей Станиславович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Петрухин Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер АО «Серпуховский завод «Металлист» (142200, Россия, Московская обл., г. Серпухов, ул. Луначарского, д. 32).

About the authors:

Alexey S. Bessonov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Information System, Institute of Cybernetics, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Eugene A. Petrukhin, Ph.D. (Phys.-Math.), Lead Engineer, JSC «Serpukhov plant «Metallist» (32, Lunacharskogo street, Serpukhov, Moscow region 142200, Russia).