

## **АППРОКСИМАЦИЯ ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА И МАТРИЦЫ ОРИЕНТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОСЕЙ ТРЕХОСНОГО КВАЗИЧЕТЫРЕХЧАСТОТНОГО ЗЕЕМАНОВСКОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА**

**Л.В. Еремин, А.Г. Зубов, Ю.Ю. Колбас, Т.И. Соловьева**

ОАО “НИИ “Полус” им. М.Ф. Стельмаха”, Москва, Россия  
e-mail: leonid.eremin@gmx.com; tigr-a-e@rambler.ru; momentmail@mail.ru;  
zzyba@yandex.ru

*Рассмотрены зависимости масштабного коэффициента и матрицы ориентации измерительных осей трехосного квазичетырехчастотного зеемановского лазерного гироскопа от угловой скорости вращения. Установлено, что зависимость масштабного коэффициента от температуры определяется изменением ширины контура усиления активной среды лазера и линейным расширением резонатора, что хорошо аппроксимируется линейной функцией. Аналогичным образом может быть описано изменение ориентации измерительных осей лазерного гироскопа, которое определяется упругими тепловыми поводками. В то же время зависимость масштабного коэффициента от угловой скорости вращения определяется статической зоной захвата и изменением потерь в резонаторе (частоты подставки) при переходе с одной моды генерации на другую и изменением температуры.*

**Ключевые слова:** зеемановский кольцевой лазер, гироскоп, масштабный коэффициент, матрица ориентации измерительных осей.

## **APPROXIMATION OF REPRODUCED DEPENDENCES OF SCALE FACTOR AND ORIENTATION MATRIX OF MEASURING AXES OF A THREE-AXIS QUASI-FOUR-FREQUENCY ZEEMAN LASER GYRO**

**L.V. Eremin, A.G. Zubov, Yu.Yu. Kolbas, T.I. Solovieva**

ОАО “НИИ “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”, Moscow, Russia  
e-mail: leonid.eremin@gmx.com; tigr-a-e@rambler.ru; momentmail@mail.ru;  
zzyba@yandex.ru

*Dependences of scale factor and orientation matrix of measuring axes of three-axis quasi-four-frequency Zeeman laser gyro upon the angular speed of rotation are considered. It is found that the temperature dependence of the scale factor is determined by change in the gain loop width of the laser phase medium and by the resonator's linear extension, which is well approximated with a linear function. Similarly, the change in orientation of measuring axes of a laser gyro, which is determined by the elastic thermal restraints, can be described. At the same time the dependence of the scale factor on the angular speed of rotation is determined by the static area of capture and by change in losses in the resonator (frequency offset) during the transfer from one generation mode to another and by variation in temperature.*

**Keywords:** Zeeman ring laser, gyro, scale factor, matrix of orientation of the measuring axes.

С появлением квазичетырехчастотных зеемановских лазерных гироскопов благодаря компенсации магнитной составляющей дрейфа существенно (примерно на порядок) повысилась точность приборов с магнитооптической частотной подставкой [1]. Однако помимо дрейфа

лазерный гироскоп имеет ряд других ошибок [2], обусловленных температурными зависимостями масштабного коэффициента и матрицы ориентации измерительных осей трехосного квазичетырехчастотного зеемановского лазерного гироскопа и зависимостью масштабного коэффициента от угловой скорости вращения.

Эти погрешности особенно вредны для маневренных объектов, в которых наиболее оправдано применение механически прочных гироскопов с магнитооптической частотной подставкой [3]. В настоящей статье рассмотрены причины возникновения указанных погрешностей и математические методы их компенсации.

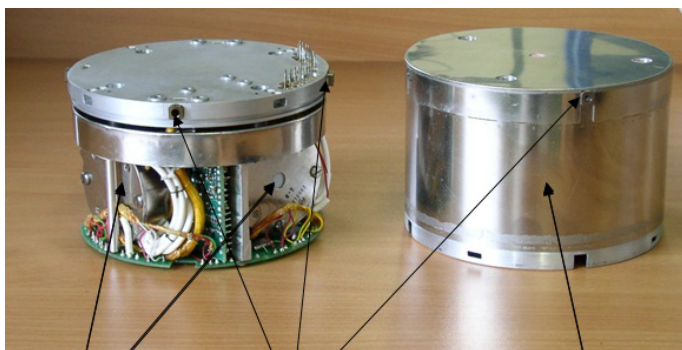
**Устройство трехосного квазичетырехчастотного зеемановского лазерного гироскопа.** Основу прибора составляют три чувствительных элемента (ЧЭ) — три кольцевых лазера с неплоским контуром, в которых генерируются световые волны с круговой поляризацией. Эти лазеры реагируют на повороты объекта в инерциальном пространстве относительно трех взаимно перпендикулярных осей  $X, Y, Z$ ; обозначим их как ЧЭ $X$ , ЧЭ $Y$ , ЧЭ $Z$ .

Для выведения ЧЭ из зоны захвата используется знакопеременная частотная подставка с помощью переменного тока, создаваемого блоком частотной подставки, общего для трех ЧЭ. Ток поступает в обмотки соленоидов ЧЭ, соединенных последовательно и создающих магнитное поле. В результате воздействия магнитного поля на активную среду за счет эффекта Зеемана обеспечивается расщепление частот встречных волн  $\sim 50$  кГц.

Для настройки частоты генерации ЧЭ на центр кривой усиления при включении прибора, а также при изменении периметра ЧЭ вследствие изменения температуры корпуса резонатора служит система регулирования периметра, которая имеет три идентичных канала, обеспечивающих независимую регулировку периметров одного из ЧЭ. Каждые 2 мин проводится перестройка периметра резонатора лазера на  $0,5\lambda$  и лазер переходит на генерацию моды с противоположным направлением вращения вектора поляризации световых волн.

Зеемановский трехосный лазерный гироскоп (ТЛГ) выполнен в виде отдельного герметичного блока и включает в себя три ЧЭ (датчика) с взаимно ортогональными осями чувствительности, функциональную электронику и блок питания. Внешний вид прибора приведен на рис. 1.

Для крепления датчиков и печатных плат с функциональной электроникой используется каркас из дюралюминия с Т-образным поперечным сечением, стенки которого стягиваются с внешним цилиндрическим корпусом и основанием прибора. Снаружи ТЛГ закрыт сварными листовыми экранами из пермаллоя, что позволяет обеспечить необходимый уровень защиты от влияния изменения внешних магнитных полей (влияние постоянного магнитного поля компенсируется



Кольцевые лазеры    Резьбовые втулки    Несущий корпус

**Рис. 1. Трехосный зеemanовский лазерный гироскоп**

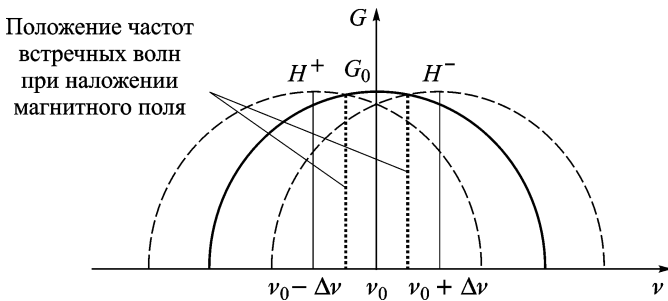
благодаря периодической смене моды генерации на моду с обратной круговой поляризацией). В основание прибора вклеены герметичные электрические вводы, выполненные на базе герметичных соединений ковар-стекло. Прибор крепится на объекте восемью резьбовыми титановыми втулками.

В результате образуется герметичная конструкция, имеющая во всех направлениях высокую степень жесткости, вследствие чего резонансные частоты прибора оказываются существенно выше характерных частот внешних воздействий.

**Температурные изменения масштабных коэффициентов зеemanовских лазерных гироскопов и методы их компенсации.** Поскольку для создания частотной подставки в зеemanовском лазере используется эффект затягивания мод с противоположной круговой поляризацией к центрам расщепленных кривых усиления (рис. 2), коэффициент преломления световых волн для каждой моды оказывается зависящим от ширины контура усиления (т.е. от температуры).

Зависимость изменения масштабного коэффициента от параметров активной среды рассмотрено в работе [4]. Зависимость масштабного коэффициента кольцевого лазера от параметров активной среды в первом приближении определяется по формуле

$$k \approx \frac{4S}{\lambda L} \times \left( 1 + \frac{c^2 G_0}{2\sqrt{\pi} L \nu_0} \frac{4c^2 \Delta \nu^2}{\nu_0^2 u^2} + \frac{\sqrt{\pi} c \gamma_{ab}}{\nu_0 u} - e^{-\left(\frac{c \Delta \nu}{\nu_0 u}\right)^2} \left( 1 - \left(\frac{c \Delta \nu}{\nu_0 u}\right)^2 \right) \right) u, \quad (1)$$



**Рис. 2. Создание зеэмановской частотной подставки:**

$G$  — коэффициент усиления активной среды;  $G_0$  — максимум коэффициента усиления в центре контура;  $H^+$  и  $H^-$  — расщепленные контуры усиления активной среды для магнитных полей по направлению распространения световой волны и против,  $\Delta\nu$  — зеэмановское расщепление контуров усиления

а изменение коэффициента преломления и соответственно изменение масштабного коэффициента от параметров активной среды — по формуле [4, 5]

$$\frac{\Delta k}{k} \approx \frac{c^2 G_0}{2\sqrt{\pi} L \nu_0} \times \left( \frac{4c^2 \Delta\nu^2}{\nu_0^2 (u + \Delta u)^2} + \frac{\sqrt{\pi} c \gamma_{ab}}{\nu_0 (u + \Delta u)} e^{-\left(\frac{c\Delta\nu}{\nu_0(u+\Delta u)}\right)^2} \left(1 - \left(\frac{c\Delta\nu}{\nu_0(u+\Delta u)}\right)^2\right) - \frac{4c^2 \Delta\nu^2}{\nu_0^2 u^2} + \frac{\sqrt{\pi} c \gamma_{ab}}{\nu_0 u} e^{-\left(\frac{c\Delta\nu}{\nu_0 u}\right)^2} \left(1 - \left(\frac{c\Delta\nu}{\nu_0 u}\right)^2\right) \right), \quad (2)$$

где  $\Delta u$  — максимальное изменение тепловой скорости движения атомов неона в рабочем диапазоне температур относительно нормальных климатических условий (+25 °C);  $\gamma_{ab}$  — значение однородного уширения контура усиления, мало изменяющееся при изменении температуры;  $u$  — тепловая скорость движения атомов неона при температуре гироскопа  $T_{\text{гир}} = 25$  °C;  $\nu_0$  — частота световой волны (для He-Ne лазера она составляет  $4,74 \cdot 10^{14}$  Гц);  $\Delta\nu$  — зеэмановское расщепление контуров усиления;  $G_0$  — коэффициент усиления активной среды в центре контура усиления;  $S$  — площадь, охватываемая оптическим контуром;  $\lambda = c/\nu_0 = 0,633$  мкм — длина волны излучения;  $L$  — длина резонатора;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме.

Отметим, что потери для мод с противоположными направлениями поляризации существенно различаются. Поскольку мы рассматриваем контур усиления в условиях наличия генерации, коэффициенты усиления

ния  $G_0^+$  и  $G_0^-$  оказываются разными. Согласно формуле (1), отношение отклонений масштабных коэффициентов от геометрического значения равно отношению коэффициентов усиления, как и отношение частот зеемановской подставки  $f^+$ ,  $f^-$ , возникающей при наложении магнитного поля на активную среду [4–6]:

$$\frac{\Delta k^+}{\Delta k^-} = \frac{G_0^+}{G_0^-} = \frac{f^+}{f^-}. \quad (3)$$

Зависимость тепловой скорости  $u$  от температуры описывается формулой

$$u = \sqrt{\frac{2kT_{\text{гир}}}{m}}, \quad (4)$$

где  $m$  — масса атома неона;  $k$  — постоянная Больцмана.

Исходя из (4), для  $\Delta u$  запишем приближенное выражение

$$\Delta u \approx \frac{u}{2} \left( \frac{T_{\text{гир}} - 25}{298} \right)^2, \quad (5)$$

где  $T_{\text{гир}}$  — температура гироскопа.

Тогда зависимость изменения масштабного коэффициента лазерного гироскопа от температуры из (2) и (5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k}{k} \approx & \frac{c^3 G_0}{2\sqrt{\pi} L \nu_0 u^2} \left\{ \frac{4c\Delta\nu^2}{\nu_0^2 u \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{T_{\text{гир}} - 25}{298} \right)^2 \right)^3} + \right. \\ & + \frac{\sqrt{\pi} \gamma_{ab}}{\nu_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{T_{\text{гир}} - 25}{298} \right)^2 \right)^2} \exp \left\{ \frac{c\Delta\nu}{\nu_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{T_{\text{гир}} - 25}{298} \right)^2 \right) u} \right\}^2 \times \\ & \times \left( 1 - \left( \frac{c\Delta\nu}{\nu_0 u \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{T_{\text{гир}} - 25}{298} \right)^2 \right)} \right)^2 \right) \left. \right\} - \\ & - \frac{4c\Delta\nu^2}{\nu_0^2 u} - \frac{\sqrt{\pi} \gamma_{ab}}{\nu_0} \exp \left\{ \left( \frac{c\Delta\nu}{\nu_0 u} \right)^2 \right\} \left( 1 - \left( \frac{c\Delta\nu}{\nu_0 u} \right)^2 \right). \quad (6) \end{aligned}$$

Оценим максимальное отклонение масштабного коэффициента. Для исследуемого зеемановского кольцевого лазера К-5  $G_0 = 0,06\%$  (рассчитано по температурной зависимости  $\frac{\Delta k}{k}$ ),  $L = 0,25$  м,  $\nu_0 = 4,74 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\Delta\nu = 10^8$  Гц,  $\gamma_{ab} = 8 \cdot 10^7$  Гц,  $T_{\text{гир}} = 90^\circ\text{C}$ . Для смеси изотопов неона-20 и неона-22 (средняя масса атома  $3,47 \cdot 10^{-26}$  кг),

используемых в зеемановских лазерных гироскопах, получим

$$u \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298}{3,47 \cdot 10^{-26}}} = 488 \text{ м/с.}$$

Поправка к геометрическому значению масштабного коэффициента при  $T_{\text{гир}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  по формуле (1)  $\frac{\Delta k}{k} \approx 9,125 \cdot 10^{-4}$  отн. ед., а максимальное отклонение в полном диапазоне температур согласно (6) —  $\max \frac{\Delta k}{k} \approx 9,38 \cdot 10^{-5}$  отн. ед.

Отношение поправок к масштабным коэффициентам для мод с противоположной поляризацией зависит от усиления, которое может быть выражено через частоту подставки; влияние оказывается на порядок меньшим, чем температурное изменение масштабного коэффициента (табл. 1).

Таблица 1

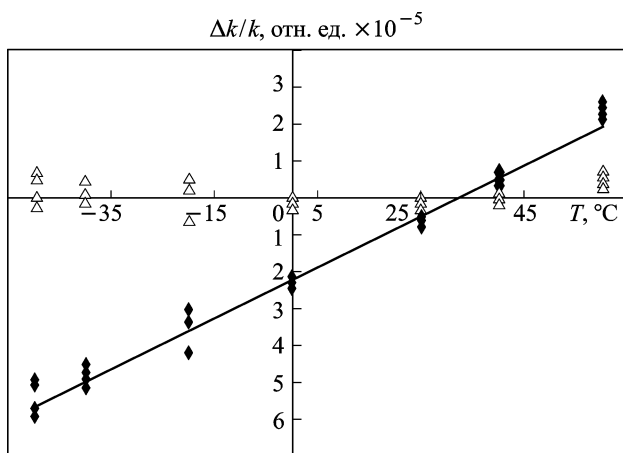
№ п.п.	Относительная разность частот подставки для мод “+” и “-”	Относительная разность поправок к масштабному коэффициенту для мод “+” и “-”
1	0,009268	$1,05922 \cdot 10^{-6}$
2	0,009281	$1,05558 \cdot 10^{-6}$
3	0,009307	$5,27804 \cdot 10^{-7}$
4	0,009429	$2,64623 \cdot 10^{-6}$
5	0,011005	$2,64625 \cdot 10^{-6}$
6	0,011086	$1,58698 \cdot 10^{-6}$
7	0,012766	$7,94935 \cdot 10^{-6}$
8	0,014403	$2,64611 \cdot 10^{-6}$
9	0,014949	$7,41781 \cdot 10^{-6}$

Некоторую роль играет и изменение линейных размеров резонатора кольцевого лазера в зависимости от температуры. Изменение периметра определяется коэффициентом теплового расширения (КТР) применяемого материала. В этом случае  $\Delta k/k$  определяется по формуле

$$\frac{\Delta k}{k} = -\text{КТР}(T_{\text{гир}} - 25). \quad (7)$$

Для ситалла  $\text{КТР} = 1,5 \cdot 10^{-7}$  отн. ед./ $^\circ\text{C}$ , соответственно для  $\max T_{\text{гир}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta k/k = -1 \cdot 10^{-5}$  отн. ед., т.е. значительно меньше поправки, вносимой активной средой.

Для компенсации отклонений масштабного коэффициента в зависимости от температуры, следует воспользоваться тем, что такая зависимость, являющаяся суммой формул (6) и (7), носит устойчивый



**Рис. 3. Зависимость относительного отклонения масштабного коэффициента зеemanовского кольцевого лазера от температуры**

характер и аппроксимируется функцией первого порядка (рис. 3). Поскольку усиления для мод с противоположными направлениями вращения вектора поляризации несколько отличаются, для каждой моды следует использовать свою функцию зависимости поправки от температуры. Остаточная погрешность  $\Delta k/k$  после аппроксимации, также приведенная на рис. 3, оказывается уменьшенной в 9 раз.

Некоторый вклад в ошибку вносит методика измерений масштабного коэффициента, прежде всего вследствие изменения дрейфа гироскопа в процессе поворота. Использование метода нечетных измерений [7] позволяет исключить дрейф гироскопов и оставить только ошибку поворота на заданный угол. В этом случае некомпенсируемая погрешность измерения равна

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta \Psi}{\Psi} + 1 - \cos \delta; \quad (8)$$

здесь  $\Psi$  — заданный угол поворота гироскопа, на котором проводится измерение масштабного коэффициента;  $\Delta \Psi$  — ошибка поворота на заданный угол;  $\delta$  — неточность измерения угла между измерительной осью гироскопа и осью вращения стенда.

При  $\Delta \Psi = 5''$  при измерении масштабного коэффициента за 2 оборота ( $\Psi = 720^\circ$ ) и  $\delta = 60''$  ошибка измерения составляет  $2 \cdot 10^{-6}$  отн. ед.

**Зависимости масштабных коэффициентов зеemanовских лазерных гироскопов от угловой скорости вращения и методы их компенсации.** Влияние захвата на масштабный коэффициент было рассмотрено в ряде теоретических и экспериментальных работ [8–10]. Зависимость относительного отклонения масштабного коэффициента от угловой скорости вращения  $\Omega$  для кольцевого лазера с трапецидальной частотной подставкой приведена на рис. 4. Эту зависимость

можно разделить на три области: 1) от 0 до  $f - 3\Omega_L$  ( $f$  — частота зеемановской подставки,  $\Omega_L$  — статическая зона захвата); 2) от  $f - 3\Omega_L$  до  $f + 3\Omega_L$ ; 3) более  $f + 3\Omega_L$ . В первой области имеется постоянная поправка к масштабному коэффициенту, в первом приближении описываемая формулой

$$\frac{\Delta k_1}{k} = \frac{1}{2} \frac{\Omega_L^2}{f^2}. \quad (9)$$

Вторая область характеризуется сильно немонотонным поведением масштабного коэффициента. Максимальное относительное отклонение масштабного коэффициента в случае частотной подставки без ошумления

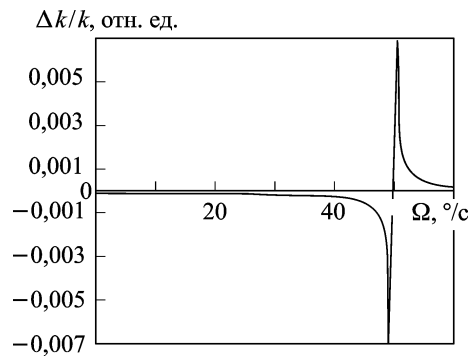
$$\frac{\Delta k_2}{k} = \frac{1}{2} \frac{\Omega_L}{f}, \quad (10)$$

причем среднее значение  $\frac{\Delta k_2}{k} = 0$ .

В области больших угловых скоростей (при  $\Omega > f + 3\Omega_L$ )  $\Delta k_3 = 0$ .

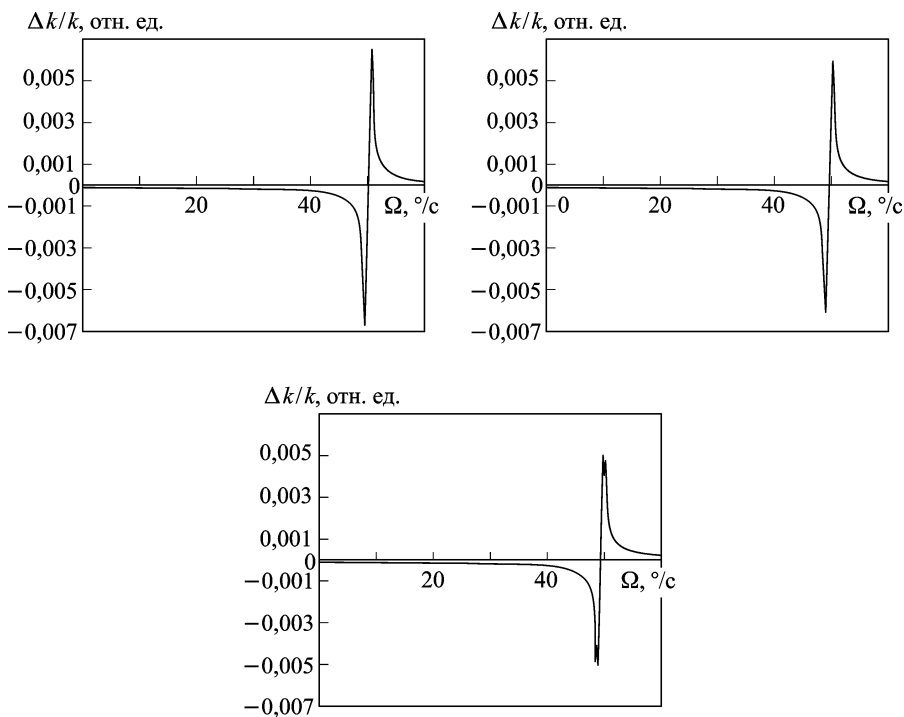
При использовании ошумления вторая область несколько изменяется — она становится шире на значение ошумления, но значение максимального отклонения масштабного коэффициента снижается. Например, если для ошумления используется меандр низкой частоты, то максимальное отклонение масштабного коэффициента снижается в 2 раза (см. рис. 5). Отметим, что вторая область очень узкая: в современных лазерах ее ширина не более  $2,4^\circ/\text{с}$  ( $0,3\%$  от диапазона измеряемых угловых скоростей), Вероятность оказаться в этой области невелика, а зафиксироваться в какой-то определенной точке можно только с применением прецизионного поворотного стенда. Поэтому среднюю поправку для этой области следует принять равной половине значения, полученного по формуле (9).

Для наилучшей компенсации отклонения масштабного коэффициента при изменении угловой скорости вращения следует использовать формулу (9) для первой области, половину поправки, вычисленной по формуле (2) для второй области, и нулевую поправку для третьей области. Как следует из рис. 6, статическая зона захвата зависит от температуры, причем для мод “+” и “-” эти зависимости разные. Соответственно также зависят от температуры и относительные отклонения масштабного коэффициента  $\frac{\Delta k_1}{k}$  в первой области (рис. 7).



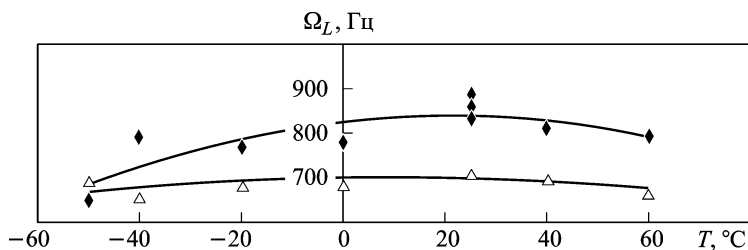
**Рис. 4.** Зависимость относительного отклонения масштабного коэффициента зеемановского кольцевого лазера от угловой скорости вращения:  $F = 50000$  Гц ( $50^\circ/\text{с}$ ),  $\Omega_L = 100$  Гц ( $0,1^\circ/\text{с}$ ),  $A_{\text{ш}} = 0$





**Рис. 5. Зависимость относительного отклонения масштабного коэффициента зеемановского кольцевого лазера от угловой скорости вращения  $F = 50000$  Гц ( $50^\circ/\text{с}$ ),  $\Omega_L = 700$  Гц ( $0,7^\circ/\text{с}$ ):**

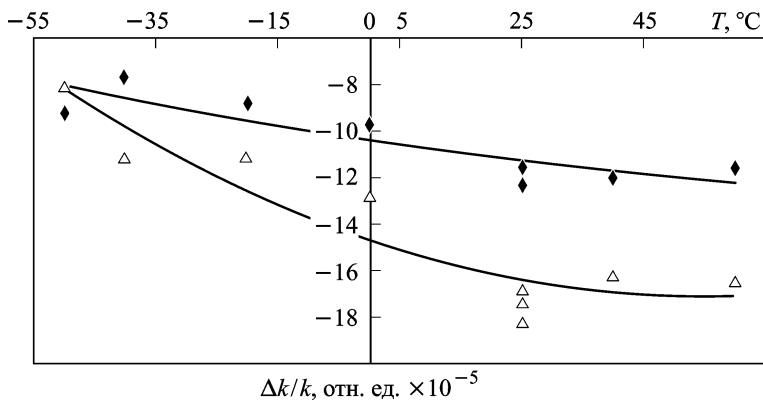
*a* –  $A_{\text{ш}} = 30$  Гц ( $0,03^\circ/\text{с}$ ); *б* –  $A_{\text{ш}} = 100$  Гц ( $0,1^\circ/\text{с}$ ); *в* –  $A_{\text{ш}} = 200$  Гц ( $0,2^\circ/\text{с}$ )



**Рис. 6. Типовые зависимости статических зон захвата для ортогональных мод генерации “+” и “-”**

Таким образом, для получения минимальной погрешности следует при расчете поправки при малых угловых скоростях (в первой области) использовать значение  $\frac{\Delta k_1}{k} = \frac{1}{2} \frac{\Omega_L^2}{f^2}$ , а для второй области  $\frac{\Delta k_2}{k} = \frac{1}{4} \frac{\Omega_L^2}{f^2}$ . Границы второй области следует принять равными  $[f - 3\Omega_L - A_{\text{ш}}; f + 3\Omega_L + A_{\text{ш}}]$ , где  $A_{\text{ш}}$  – амплитуда десинхронизирующего сигнала.

Результаты экспериментальных исследований для первой области приведены в табл. 2.



**Рис. 7. Типовые зависимости относительных отклонений масштабного коэффициента зеемановского кольцевого лазера на угловых скоростях вращения, меньших частоты подставки, от температуры для ортогональных мод генерации “+” и “-”**

Таблица 2

Ось ТЛГ, мода	Измеренное $\frac{\Delta k_1}{k}$ , отн. ед. $\times 10^{-5}$	Расчетная поправка $\frac{\Delta k_1}{k}$ , отн. ед. $\times 10^{-5}$	Остаточная ошибка
X, мода “+”	-12,287	-16,350	$-4,06316 \cdot 10^{-5}$
	-9,690	-14,626	$-4,93548 \cdot 10^{-5}$
	-9,160	-8,177	$9,82806 \cdot 10^{-6}$
	-7,627	-9,787	$-2,15974 \cdot 10^{-5}$
	-8,741	-12,526	$-3,78499 \cdot 10^{-5}$
	-11,597	-16,350	$-4,75316 \cdot 10^{-5}$
	-11,493	-17,085	$-5,59232 \cdot 10^{-5}$
	-11,915	-16,905	$-4,99014 \cdot 10^{-5}$
	-11,597	-16,350	$-4,75316 \cdot 10^{-5}$
X, мода “-”	-17,369	-11,267	$6,10171 \cdot 10^{-5}$
	-12,814	-10,367	$2,44696 \cdot 10^{-5}$
	-8,000	-7,987	$1,29138 \cdot 10^{-7}$
	-11,177	-8,525	$2,65212 \cdot 10^{-5}$
	-11,123	-9,508	$1,61523 \cdot 10^{-5}$
	-16,788	-11,267	$5,52071 \cdot 10^{-5}$
	-16,468	-12,203	$4,26484 \cdot 10^{-5}$
	-16,256	-11,715	$4,54126 \cdot 10^{-5}$
	-18,162	-11,267	$6,89471 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, применение предложенной коррекции позволяет уменьшить ошибку измерений в первой области в среднем в 2–3 раза.

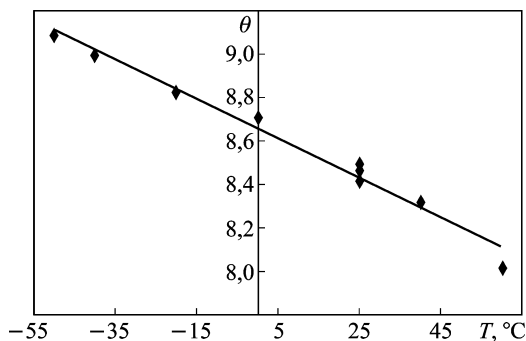


Рис. 8. Типовая зависимость угла между измерительными осями гироскопов и приборными осями корпуса всего прибора от температуры

**Температурные изменения матрицы ориентации измерительных осей ТЛГ и методы их компенсации.** Поскольку в ТЛГ сочленяются материалы с КТР, отличающимся в десятки раз, возникают упругие перекосы конструкции в основном в местах соединения наиболее разнородных материалов, например, ситалл корпуса лазера — дюралюминий основания и крестовины. Зависимость угла  $\theta$  между измерительной осью каждого гироскопа и одноименной приборной осью корпуса всего прибора от температуры может быть описана формулой

$$\theta = \frac{(КТР1 - КТР2)(T_{гир} - 25)}{2} + \theta_{25^{\circ}\text{C}}, \quad (11)$$

где  $\theta_{25^{\circ}\text{C}}$  — значение этого угла при  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

Как было указано ранее, для ситалла  $КТР2 = 1,5 \cdot 10^{-7}$  отн. ед./°C, для алюминиевых сплавов  $КТР1 = 200 \cdot 10^{-7}$  отн. ед./°C. Таким образом, изменение температуры на 1 °C приводит к изменению ориентации осей на 2". Для  $\max T_{гир} = 90^{\circ}\text{C}$  изменение ориентации осей достигнет 150". В то же время эта зависимость совершенно линейна от температуры и, исключая малые пластические деформации, хорошо воспроизводима (рис. 8). Использование линейной функции типа (11) позволяет уменьшить погрешность до 0,09', т.е. в 7 раз (рис. 9).

**Заключение.** Использование достаточно простой алгоритмической коррекции масштабного коэффициента по температуре и угло-

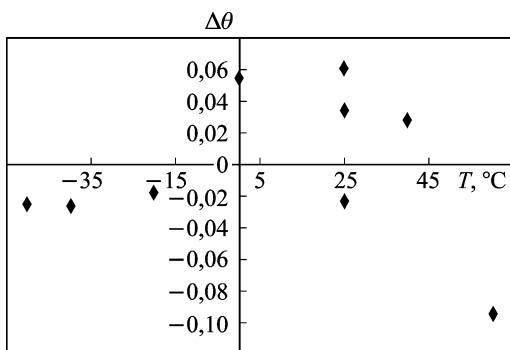


Рис. 9. Погрешность аппроксимации угла между измерительными осями гироскопов и приборными осями корпуса всего прибора в диапазоне рабочих температур

вой скорости позволяет в 9 раз снизить погрешность измерений на больших угловых скоростях и в 2–3 раза на малых угловых скоростях. Аналогичный метод, примененный к матрице ориентации измерительных осей, повышает в 7 раз стабильность матрицы ориентации измерительных осей лазерного гироскопа относительно приборных осей ТЛГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриев В.Г., Голяев Ю.Д., Винокуров Ю.А.* и др. Лазерный гироскоп повышенной точности // Материалы 15 Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2008.
2. *Серегин В.В., Кукуев Р.М.* Лазерные гироскопы и их применение. М.: Машиностроение, 1990.
3. *Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Зверев Г.М.* Лазерные гироскопы второго поколения // Военный парад. 2003. № 3 (57). С. 96–97.
4. *Аронович Ф.* Лазерный гироскоп // Сб. Применение лазеров / под ред. В.П. Тычинского. М.: Мир, 1974. С. 258–261.
5. *Привалов В.Е.* Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. Л.: Судостроение, 1989.
6. *Хромых А.М., Якушев А.И.* Влияние пленения резонансного излучения на эффект Зеемана в кольцевом лазере // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 1.
7. *Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Соловьева Т.И., Мещеряков Б.Т.* Способ определения масштабного коэффициента кольцевого лазера. Патент РФ № 1797432, 1993.
8. *Хромых А.М.* Динамическая характеристика кольцевых лазеров с периодической частотной подставкой // Электронная техника. 1990. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. Вып. 1 (53).
9. *Найда О.Н., Руденко В.В.* Частотная характеристика кольцевого лазера с периодической частотной подставкой трапециевидальной формы // Электронная техника. 1990. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. Вып. 1 (53).

## REFERENCES

1. *Dmitriev V.G., Golyaev Yu.D., Vinokurov Yu.A., Kolbas Yu.Yu., Tikhmenev N.V.* High-precision laser gyro. Mater. 15 Mezhdunar. Konf. Integr. Navig. Sist. [Proc. 15th Int. Conf. Integr. Navig. Syst.]. St. Petersburg, 2008 (in Russ.).
2. *Seregin V.V., Kukuev R.M.* Lazernye girometry i ikh primeneniye [Laser gyrometers and their application]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 287 p.
3. *Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G., Zverev G.M.* The second generation of laser gyroscopes. *Voennyi Parad* [Mil. Parade], 2003, vol. 3, no. 57, pp. 96–97 (in Russ.).
4. *Aronowitz F.* The laser giro. *Laser applications*. London, Academic Press, 1971, pp. 133–194. (Russ. ed.: Aronovits F. Lazernyy giroskop. *Primeneniye lazerov*. Moscow, Mir Publ., 1974, pp. 182–263.).
5. *Privalov V.E.* Gazorazryadnye lazery v izmeritel'nykh kompleksakh [Gas-discharge lasers in measurement systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 259 p.
6. *Khromykh A.M., Yakushev A.I.* The influence of resonance radiation trapping on the Zeeman effect in a ring laser. *Kvantovaya electron.* [Quantum Electron.], 1977, vol. 4, no. 1, pp. 18–21 (in Russ.).
7. *Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu., Solov'eva T.I., Meshcheryakov B.T.* Spособ opredeleniya masshtabnogo koeffitsienta kol'tsevogo lazera [The way to determine the ring laser scale factor]. Patent RF, no. 1797432, 1993.

8. *Khromykh A.M.* The dynamic characteristics of ring lasers with a periodic frequency support. *Lazernaya Tekhnol. Optoelektron.* [Laser Technol. Optoelectron.], 1990, vol. 53, no. 1, p. 11 (in Russ.).
9. *Nayda O.N., Rudenko V.V.* The frequency response of a ring laser with a periodic frequency stand trapezoidal in shape. *Lazernaya Tekhnol. Optoelektron.* [Laser Technol. Optoelectron.], 1990, vol. 53, no. 1, p. 11 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.12.2012

Л.В. Еремин — инженер ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

L.V. Eremin — engineer of the ОАО “NII “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”.

ОАО “NII “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342 Russia.

А.Г. Зубов — канд. техн. наук, начальник участка ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”. Автор более 100 научных работ в области управления и обработки информации.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

A.G. Zubov — Cand. Sci. (Eng.), head of section of the ОАО “NII “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”. Author of more than 100 publications in the field of control and data processing.

ОАО “NII “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342 Russia.

Юрий Юрьевич Колбас — начальник отдела ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”. Автор 28 научных работ в области лазерной гироскопии и лазерной медицины.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

Yu.Yu. Kolbas — head of department of the ОАО “NII “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”. Author of 28 publications in the field of laser gyroscopy and laser medicine.

ОАО “NII “Polyus” n.a. M.F. Stelmakh”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342 Russia.

Татьяна Ивановна Соловьева — канд. техн. наук. Автор более 70 научных работ в области квантовой электроники и лазерной биомедицины.

T.I. Solovieva — Cand. Sci. (Eng.). Author of more than 70 publications in the field of quantum electronics and laser biomedicine.