

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ДРЕЙФА НУЛЯ ЗЕЕМАНОВСКОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ МОД ГЕНЕРАЦИИ

Ю.Ю. Колбас
М.А. Иванов

tigra-e@rambler.ru
maxim_y2k@mail.ru

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы временные и температурные дрейфы нуля зеемановского лазерного гироскопа, работающего в режиме периодической перестройки на продольную моду генерации с противоположной круговой поляризацией световой волны. В таком гироскопе дрейф нуля может быть разделен на магнитную и немагнитную составляющие, имеющие различную природу и вносящие существенно разный вклад в конечную ошибку. Предложены алгоритмические методы математической компенсации дрейфов нулей зеемановского лазерного гироскопа как при возможности использования начальной калибровки, так и без нее. Показано, что одновременное использование воспроизводимых зависимостей магнитного и немагнитного дрейфов нулей от изменения температуры гироскопа позволяет решить задачу коррекции дрейфа нуля оптимальным образом. Коэффициенты коррекции рассчитаны по температуре зеемановского лазерного гироскопа в момент включения. Используя разность между температурами гироскопа и корпуса изделия, в котором он установлен, можно определить температуру зеемановского лазерного гироскопа в момент включения, тем самым сняв проблему расчета коэффициентов коррекции в случае, если гироскоп был выключен, а затем снова включен. Приведены экспериментальные результаты для нескольких зеемановских лазерных гироскопов с типовыми значениями дрейфов нулей

Ключевые слова

*Лазерный гироскоп, эффект
Зеемана, дрейф нуля, темпера-
турные зависимости, термо-
датчик*

Поступила 09.04.2018
© Автор(ы), 2019

Введение. Коррекция дрейфов нулей зеemanовских лазерных гироскопов (ЗЛГ) с использованием воспроизводимых зависимостей рассмотрена, например, в [1]. Для зеemanовских лазерных гироскопов с попеременной работой на продольных модах с противоположной круговой поляризацией («квазичетырехчастотный» режим генерации) отдельная математическая коррекция дрейфов нулей по температурам ЗЛГ и окружающей среды (температуре корпуса изделия, в котором установлен ЗЛГ), предложенная в [2], позволила в несколько раз уменьшить суммарный дрейф прибора, доведя его до $0,2 \text{ }^\circ/\text{ч}$ на режиме без начальной калибровки. За прошедшие 3 года путем улучшения технологии изготовления и совершенствования электронных блоков этот параметр удалось уменьшить до $0,1 \text{ }^\circ/\text{ч}$. Дальнейшее продвижение по точности остановилось, поскольку невозможно добиться лучшей симметрии светового контура резонатора ЗЛГ и невозможно стабилизировать положение световых лучей по сечению газоразрядных каналов при саморазогреве ЗЛГ [3]. Было обнаружено, что при саморазогреве ЗЛГ зависимости немагнитной и магнитной составляющих дрейфа хорошо воспроизводимы при неизменной температуре окружающей среды, что наблюдается во многих применениях ЗЛГ, поскольку массивный корпус изделия, в котором он установлен, имеет постоянную времени теплового прогрева больше суток и за несколько часов работы ЗЛГ температуру внутри корпуса изделия можно считать постоянной. Это обстоятельство было использовано для разработки усовершенствованного алгоритма математической коррекции дрейфа нуля ЗЛГ.

1. Дрейф зеemanовского кольцевого лазера на квазичетырехчастотном режиме работы в условиях постоянной температуры окружающей среды был исследован в [4], где приведена зависимость дрейфа ЗЛГ, т. е. ошибочно накопленного угла кажущегося поворота P (рис. 1), от времени работы. Было показано, что токовая составляющая дрейфа проявляется в постоянном возрастании угла ошибки со скоростью немаг-

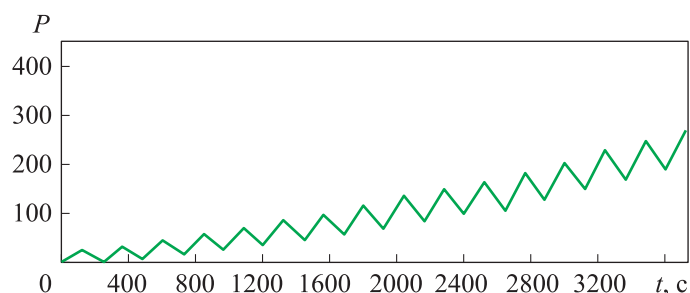


Рис. 1. Типовой дрейф (ошибочно накопленный угол P) ЗЛГ в зависимости от времени работы t

нитной составляющей дрейфа $\Omega_{g\text{ нм}}$. Магнитная составляющая дрейфа приводит к появлению «пилю», амплитуда которой равна $M \cdot T \cdot W_{g\text{ м}}$, где M — количество периодов коммутации подставки T между переключениями мод; $\Omega_{g\text{ м}}$ — магнитная составляющая дрейфа. Величина MT лежит в пределах 1...2 мин [4].

В моменты переключения мод возникает дополнительная ошибка, связанная с немгновенной перестройкой лазера с одной моды на другую, δP_{max} — максимальная угловая ошибка на каждом переключении. Максимальная суммарная ошибка Ω_g в момент времени t равна

$$\Omega_g = \Omega_{g\text{ нм}} + \frac{A_{q\text{ м}} A_T \tau_T}{2MT} \left(1 - e^{-MT/\tau_T}\right)^2 + \frac{MT\Omega_{g\text{ м}}}{t} + \frac{1}{MT} \delta P_{\text{max}}. \quad (1)$$

Уравнение (1) получено в приближении, что изменение магнитного дрейфа $\Omega_{g\text{ нм}}$ от времени носит экспоненциальный (тепловой) характер и описывается формулой

$$\Omega_{g\text{ м}} = A_{q\text{ м}} A_T \left(1 - e^{-t/\tau_T}\right) + \Omega_{g\text{ мо}}, \quad (2)$$

где $A_{q\text{ м}}$ — магнитная составляющая дрейфа, зависящая от изменения температуры ЗЛГ после включения; A_T — тепловой перегрев ЗЛГ; τ_T — постоянная времени теплового перегрева; $\Omega_{g\text{ мо}}$ — магнитная составляющая дрейфа в момент включения.

Вклад магнитной составляющей дрейфа линейно убывает с уменьшением времени между переключениями, включая квазинемагнитную составляющую. Вклад ложных сигналов на переключениях мод линейно растет с уменьшением времени между переключениями.

Значение параметра δP_{max} может быть сведено до половины дискрета выходной информации k [5, 6], а соответственно ее вклад в Ω_g не превысит $k / (2MT)$. Для ЗЛГ К-5 производства АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» при формировании четырех импульсов на один период биений встречных волн $k = 0,7''$, а $\delta P_{\text{max}} / (MT) \approx 0,005$ °/ч.

Рассмотрим температурные зависимости магнитной и немагнитной составляющих дрейфов нулей ЗЛГ.

2. Магнитная составляющая дрейфа зеэмановского кольцевого лазера. Выбор алгоритма коррекции и сравнение с экспериментальными результатами. На рис. 2 приведены температурные зависимости магнитной составляющей дрейфа для ЗЛГ К-5. Данные получены в условиях

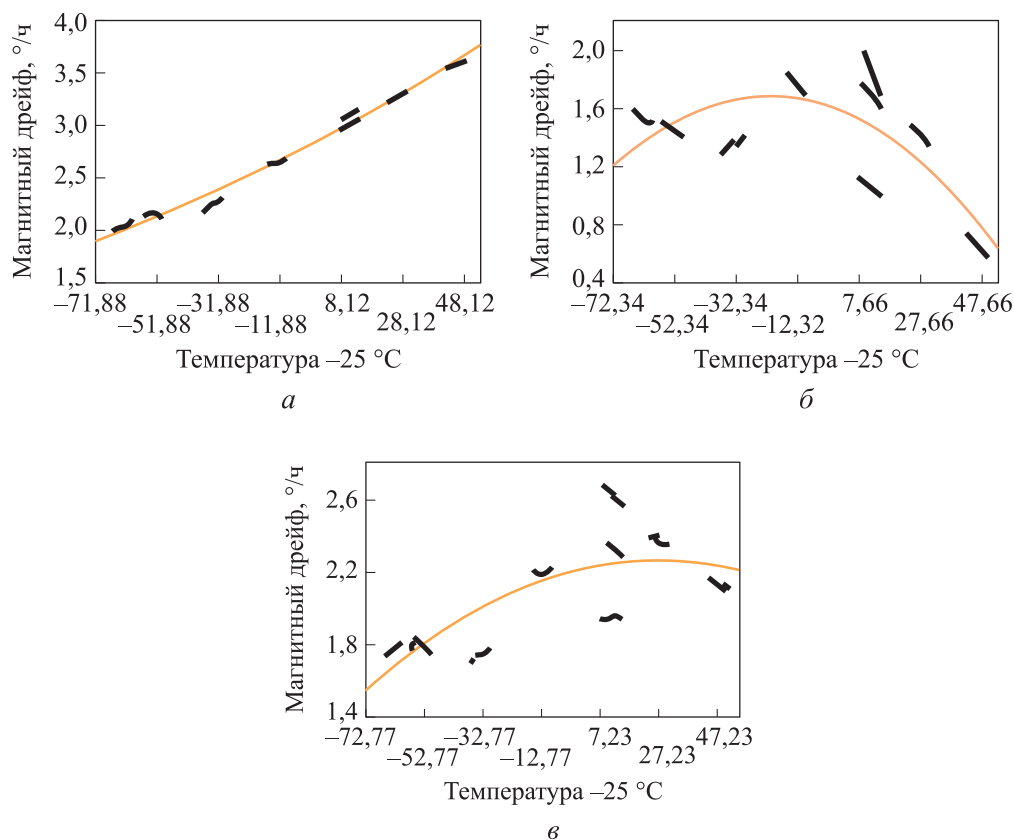


Рис. 2. Зависимости магнитной составляющей дрейфа нуля ЗЛГ К-5 от температуры ЗЛГ

измерения магнитной составляющей дрейфа трех ЗЛГ с общими электронными блоками, находящимися в одном корпусе, но имеющими каждый свой цилиндрический экран из пермаллоя 79НМ, с интервалом между переключениями мод $MT = 60$ с и временем работы один час при неизменной температуре окружающей среды и неизменном положении прибора относительно земной поверхности.

Анализ зависимостей показывает следующее.

1. Абсолютная величина магнитной составляющей дрейфа нуля не превышает $3^\circ/\text{ч}$.

2. Изменение магнитной составляющей дрейфа нуля в одном включении за счет самопрогрева (который составляет $\approx 15^\circ\text{C}/\text{ч}$) достигает $0,4^\circ/\text{ч}$. При этом отсутствует корреляция между изменениями магнитного дрейфа трех ЗЛГ одного прибора, что свидетельствует об отсутствии динамических дрейфов, связанных с электронными блоками. Магнитный дрейф нуля во всем диапазоне температур не может быть описан гладкой непрерывной функцией во всех случаях (рис. 2, б, в).

3. Наблюдается линейная зависимость изменения магнитной составляющей дрейфа нуля от изменения температуры ЗЛГ при самопрогреве.

4. Невоспроизводимость магнитной составляющей дрейфа нуля (разность между значениями при одной и той же температуре, но в разных включениях) не превышает $\pm 0,4$ °/ч (см. рис. 2, б).

Анализ физических причин возникновения магнитной составляющей дрейфа нуля ЗЛГ, проведенный в [7], показал, что причинами как изменения, так и невоспроизводимости магнитного дрейфа в ЗЛГ являются магнитоупругие эффекты в магнитных экранах ЗЛГ, вызванные их короблением при самопрогреве или изменении температуры вокруг ЗЛГ, а также токи термоЭДС, возникающие в местах контакта металлов с разной работой выхода, например пермалловых магнитных экранов и дюралевого корпуса ЗЛГ. В меньшей степени влияет изменение от температуры остаточной намагниченности магнитных экранов и коэффициента магнитной чувствительности ЗЛГ. Как магнитоупругий эффект, так и термоЭДС зависят от изменения температуры [4, 7], что делает удобным использование для термокоррекции магнитной составляющей дрейфа линейную зависимость от разности между текущей температурой ЗЛГ T и температурой ЗЛГ в момент включения $T_{\text{вк}}$. В этом случае текущее значение магнитной составляющей дрейфа находится по формуле

$$\Omega_{g\text{м}} = \Omega_{g\text{мо}} + B_{\text{м}}(T - T_{\text{вк}}). \quad (3)$$

Коэффициенты $\Omega_{g\text{мо}}$ и $B_{\text{м}}$ описываются полиномами второго порядка от температуры включения ЗЛГ.

Такой алгоритм позволяет легко проводить уточнение значения $\Omega_{g\text{мо}}$, если некоторое время после включения ЗЛГ не меняет свое положение относительно Земли (проводить калибровку):

$$\Omega_{g\text{мо}} = \ddot{\Omega}_{g\text{м}} - \frac{1}{2} B_{\text{мо}}(T_{\text{кк}} - T_{\text{нк}}), \quad (4)$$

где $\ddot{\Omega}_{g\text{м}}$ — среднее измеренное значение магнитной составляющей дрейфа нуля при калибровке; $T_{\text{нк}}$ — температура ЗЛГ в момент начала калибровки; $T_{\text{кк}}$ — температура ЗЛГ в момент окончания калибровки.

К сожалению, использование формулы (4) становится затруднительным, если прибор был прогрет до начала режима измерений. Если иметь информацию о температуре окружающей среды, то можно ее принять за $T_{\text{вк}}$, но обычно термодатчики снаружи ЗЛГ установить не удастся. В этом случае следует установить термодатчик на корпусе изделия ЗЛГ и измерить разность между температурой корпуса и температурой ЗЛГ (рис. 3).

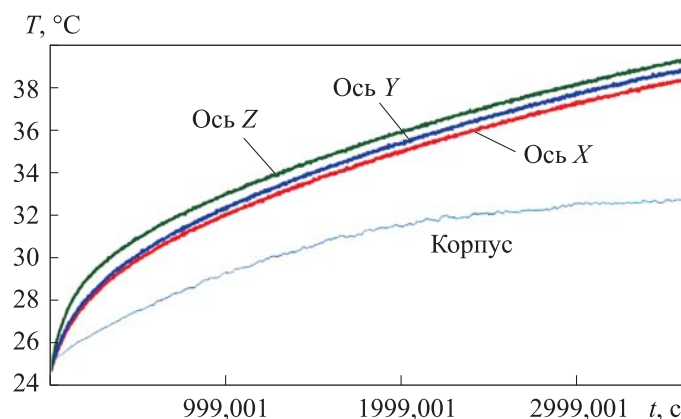


Рис. 3. Зависимость температуры ЗЛГ (три оси) и корпуса от времени работы
 $T_{\text{BK}} = + 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Как следует из рис. 3, зависимости температур кольцевого лазера T и корпуса ЗЛГ T_{K} от времени работы описываются формулами:

$$\begin{aligned} T &= A_{1T} \left(1 - e^{-t/\tau_{1T}}\right) + A_{2T} \left(1 - e^{-t/\tau_{2T}}\right) + A_{T_{\text{K}}} \left(1 - e^{-t/\tau_{T_{\text{K}}}}\right) + T_{\text{BK}}; \\ T_{\text{K}} &= A_{T_{\text{K}}} \left(1 - e^{-t/\tau_{T_{\text{K}}}}\right) + T_{\text{BK}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где A_{1T} — амплитуда собственного теплового перегрева кольцевого лазера ЗЛГ из-за тепловыделения в нем; τ_{1T} — постоянная времени собственного теплового перегрева кольцевого лазера ЗЛГ; A_{2T} — амплитуда дополнительного теплового перегрева ЗЛГ из-за тепловыделения в окружающих электронных блоках; τ_{2T} — постоянная времени дополнительного теплового перегрева ЗЛГ из-за тепловыделения в окружающих электронных блоках; $A_{T_{\text{K}}}$ — амплитуда теплового перегрева корпуса изделия; $\tau_{T_{\text{K}}}$ — постоянная времени теплового перегрева корпуса изделия; T_{BK} — температура ЗЛГ и корпуса изделия в момент включения ЗЛГ.

Параметры A_{1T} , τ_{1T} , A_{2T} , τ_{2T} , $A_{T_{\text{K}}}$, $\tau_{T_{\text{K}}}$ определяются при заводской регулировке.

Тогда из (5) можно найти сначала момент времени t , в какой начался прием информации в данном включении, и соответствующую ему T_{BK} .

Величина t находится из решения уравнения

$$T - T_{\text{K}} = A_{1T} \left(1 - e^{-t/\tau_{1T}}\right) + A_{2T} \left(1 - e^{-t/\tau_{2T}}\right) \quad (6)$$

для $T > T_{\text{K}}$, для $T \leq T_{\text{K}}$, $t = 0$, а T_{BK} — из уравнения

$$T_{\text{BK}} = T_{\text{K}} - A_{T_{\text{K}}} \left(1 - e^{-t/\tau_{T_{\text{K}}}}\right). \quad (7)$$

Далее по T_{BK} производится расчет $\Omega_{g_{\text{MO}}}$, V_{MO} и $\Omega_{g_{\text{M}}}$.

Предлагаемый алгоритм позволяет уменьшить магнитный дрейф практически до величины воспроизводимости величины $\Omega_{g_{\text{MO}}}$ — 0,15...0,4 °/ч.

3. Немагнитная составляющая дрейфа нуля зеемановского кольцевого лазера. Выбор алгоритма коррекции и сравнение с экспериментальными результатами. На рис. 4 приведены зависимости немагнитной составляющей дрейфа нуля ЗЛГ К-5 от температуры. Данные получены в условиях измерения немагнитной составляющей дрейфа трех ЗЛГ с общими электронными блоками, точками с интервалом между переключениями мод $MT = 90$ с и временем работы 1 ч при неизменной температуре окружающей среды и неизменном положении прибора относительно земной поверхности.

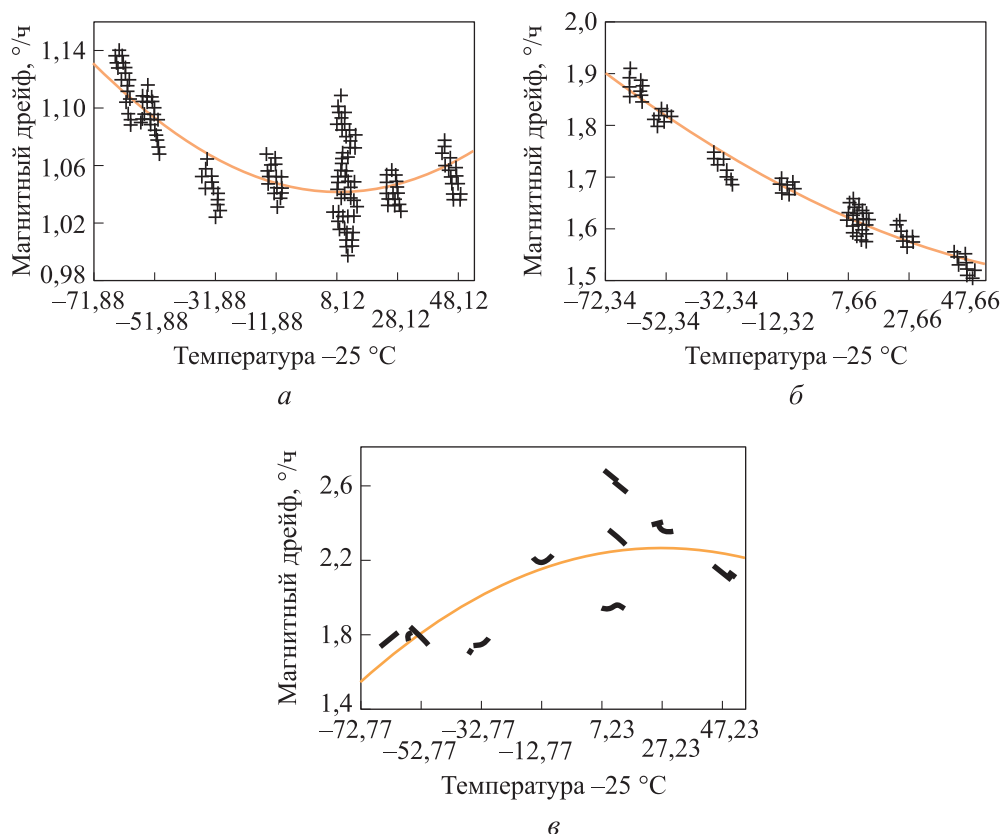


Рис. 4. Зависимости немагнитной составляющей дрейфа нуля ЗЛГ от температуры; кривая — аппроксимация полиномом второго порядка от температуры ЗЛГ

Анализ зависимостей показывает:

1) абсолютная величина немагнитного дрейфа не превышает $2^\circ/\text{ч}$;
 2) изменение немагнитного дрейфа нуля в одном включении за счет самопрогрева может быть описано двумя линейными функциями от изменения температуры ЗЛГ: первой до изменения температуры ЗЛГ на 5°C со скоростью до $0,07^\circ/(\text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$ и дальнейшей второй со скоростью до $0,0035^\circ/(\text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$;

3) невоспроизводимость немагнитной составляющей дрейфа нуля (разность между значениями при одной и той же температуре, но в разных включениях) составляет не более $\pm 0,025^\circ/\text{ч}$.

Предложен следующий алгоритм коррекции немагнитной составляющей дрейфа нуля:

$$\Omega_{g_{\text{HM}}} = \begin{cases} \Omega_{g_{\text{HMO1}}} + B_{\text{HM1}}(T - T_{\text{BK}}) & \text{при } T - T_{\text{BK}} \leq 5^\circ\text{C}; \\ \Omega_{g_{\text{HMO2}}} + B_{\text{HM2}}(T - T_{\text{BK}}) & \text{при } T - T_{\text{BK}} > 5^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (8)$$

Коэффициенты $\Omega_{g_{\text{HMO1,2}}}$ и $B_{\text{HM1,2}}$ описываются полиномами второго порядка от температуры включения ЗЛГ. В случае несовпадения T и T_{K} в момент включения ЗЛГ T_{BK} рассчитывается по формулам (6) и (7).

Такой алгоритм позволяет легко проводить уточнение значения $\Omega_{g_{\text{HMO}}}$, если некоторое время после включения ЗЛГ не меняет свое положение относительно Земли и проекция угловой скорости вращения Земли известна (проводить калибровку):

$$\Omega_{g_{\text{MO1,2}}} = \ddot{\Omega}_{g_{\text{M}}} - \frac{1}{(T_{\text{KK}} - T_{\text{HK}})} \int_{T_{\text{HK}}}^{T_{\text{KK}}} B_{\text{MO1,2}}(T - T_{\text{BK}}) dT, \quad (9)$$

где $\ddot{\Omega}_{g_{\text{M}}}$ — среднее измеренное значение магнитной составляющей дрейфа нуля при калибровке; T_{BK} — температура ЗЛГ в момент включения. Используются коэффициенты $\Omega_{g_{\text{MO1}}}$ и B_{HM1} или $\Omega_{g_{\text{HMO2}}}$ и B_{HM2} в зависимости от разности $(T - T_{\text{BK}})$ больше или меньше 5°C .

Результаты использования разработанного алгоритма коррекции дрейфов нулей ЗЛГ приведены в таблице.

Из таблицы следует, что ЗЛГ К-5 имеет точность без алгоритмической коррекции не хуже $0,2^\circ/\text{ч}$, а с коррекцией — не хуже $0,05^\circ/\text{ч}$; использование калибровки сразу после включения не приносит положительных результатов, поскольку немагнитная составляющая дрейфа нуля ЗЛГ на участке «выбега» имеет природу, существенно отличающуюся

Дрейфы нулей ЗЛГ К-5 в диапазоне температур – 50...+ 70 °С

Вариант применения ЗЛГ	Ось X	Ось Y	Ось Z
Прибор меняет ориентацию относительно Земли во время включения (без дополнительной калибровки)	До коррекции 0,11 °/ч; после коррекции 0,04 °/ч	До коррекции 0,05 °/ч; после коррекции 0,02 °/ч	До коррекции 0,16 °/ч; после коррекции 0,01 °/ч
Прибор неподвижен во время включения ($T_{\text{кк}} - T_{\text{вк}}) \leq 5 \text{ } ^\circ\text{C}$	До коррекции 0,11 °/ч; после коррекции 0,09 °/ч; после комбинированной коррекции 0,038 °/ч	До коррекции 0,04 °/ч; после коррекции 0,07 °/ч; после комбинированной коррекции 0,02 °/ч	До коррекции 0,15 °/ч; после коррекции 0,05 °/ч; после комбинированной коррекции 0,01 °/ч
Прибор неподвижен во время включения ($T_{\text{кк}} - T_{\text{вк}}) > 5 \text{ } ^\circ\text{C}$	До коррекции 0,01 °/ч; после коррекции 0,006 °/ч	До коррекции 0,02 °/ч; после коррекции 0,012 °/ч	До коррекции 0,07 °/ч; после коррекции 0,007 °/ч

от дальнейшего дрейфа нуля и с ним слабо коррелирует (строки 1 и 2 таблицы). Поэтому при возможности провести калибровку дрейфов нулей ЗЛГ на участке «выбега» следует применять комбинированную коррекцию — корректировать постоянные члены в формуле (3) для магнитной составляющей дрейфа нуля и в верхней строке формулы (8) для немагнитной составляющей дрейфа нуля. Для остального времени работы коэффициенты немагнитной составляющей дрейфа нуля не корректируются. Использование такой коррекции позволяет достичь точности не хуже $0,04$ °/ч. Калибровка дрейфа нуля на участке после «выбега» уменьшает максимальную ошибку до $0,015$ °/ч. Алгоритм устойчив к перерывам в работе ЗЛГ на любое время.

Выводы. Использование предложенных алгоритмов коррекции магнитной и немагнитной составляющих дрейфов нулей ЗЛГ позволяет уменьшить в несколько раз дрейф нуля ЗЛГ, работающего в квазичетырехчастотном режиме. Предложенный алгоритм устойчив к выключению и повторному включению ЗЛГ независимо от времени перерыва в работе.

В то же время наиболее эффективным методом борьбы с магнитными полями, возникающими из-за токов термоЭДС в местах контакта металлов с разной работой выхода, является диэлектрическое изолирование этих контактов [7].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Рассказов А.П. Аппроксимация воспроизводимых временных и температурных зависимостей смещения нуля кольцевого лазера. *Электронная техника. Лазерная техника и оптоэлектроника*, 1991, № 2, с. 49–52.
- [2] Колбас Ю.Ю., Ладонкина М.В., Соловьева Т.И. Дрейф зеемановского лазерного гироскопа с переключением продольных мод генерации. *Качество. Инновации. Образование*, 2015, № 3, с. 35–46.
- [3] Колбас Ю.Ю., Грушин М.Е., Горшков В.Н. Немагнитная составляющая смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа. *Квантовая электроника*, 2018, т. 48, № 3, с. 283–289. DOI: 10.1070/QEL16509
- [4] Вахитов Н.Г., Голяев Ю.Д., Дронов И.В. и др. Зеемановский лазерный гироскоп с переключением продольных мод генерации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение*, 2014, № 2, с. 10–27.
- [5] Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю. Ошибка дискретности выходного сигнала кольцевого лазера с периодической подставкой. *ЖТФ*, 1991, т. 17, № 8, с. 162–165.
- [6] Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю. Использование кольцевых лазеров для определения направлений на полюсы вращения Земли. *Квантовая электроника*, 2012, т. 42, № 10, с. 949–952. DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014898

[7] Колбас Ю.Ю., Савельев И.И., Хохлов Н.И. Влияние внешних и внутренних магнитных полей на стабильность смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа. *Квантовая электроника*, 2015, т. 45, № 6, с. 573–581.

DOI: 10.1070/QE2015v045n06ABEH015538

Колбас Юрий Юрьевич — д-р техн. наук, заместитель начальника АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 113742, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

Иванов Максим Алексеевич — начальник лаборатории АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 113742, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колбас Ю.Ю., Иванов М.А. Усовершенствованный алгоритм математической коррекции дрейфа нуля зеемановского лазерного гироскопа с переключением продольных мод генерации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 2, с. 91–103. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-2-91-103

AN IMPROVED ALGORITHM FOR MATHEMATICAL CORRECTION OF THE ZERO DRIFT OF THE ZEEMAN LASER GYRO WITH SWITCHING LONGITUDINAL MODE OF GENERATION

Yu.Yu. Kolbas

tigra-e@rambler.ru

M.A. Ivanov

maxim_y2k@mail.ru

JSC “Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper addresses time and temperature zero drifts in Zeeman laser gyroscope (RLG) operating in the mode of periodic adjustment of RLG to the longitudinal mode of generation with the opposite circular polarization of the light wave. In such a gyroscope, the zero drift can be divided into magnetic and non-magnetic components having different nature and making a significantly different contribution to the final error. Algorithmic methods are proposed for mathematical compensation of RLG zero drift, both with and without using initial calibration. It is shown that the simultaneous use of reproducible dependencies of the magnetic and non-magnetic zero drifts due to RLG temperature changes allows solving the problem of RLG zero drift

Keywords

Laser gyroscope, Zeeman effect, zero drift, temperature dependence, temperature sensor

correction in the optimal way. The correction factors are calculated from the temperature of a Zeeman laser gyro at the moment of activation. At the same time, using the difference between the temperatures of the gyroscope and gyro case, where it is installed, it is possible to determine the temperature of the Zeeman laser gyroscope at the moment of switching on, thereby eliminating the problem of calculating the correction factors when the gyroscope is turned off and then on again. Experimental results for several Zeeman laser gyroscopes with typical values of zero drifts are presented

Received 09.04.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

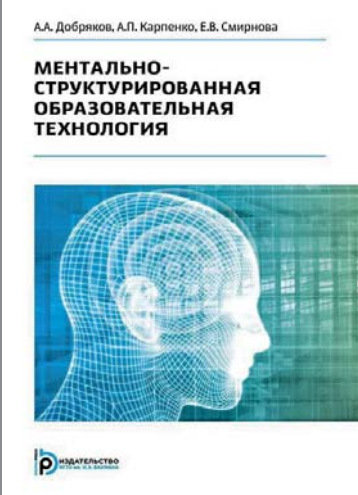
- [1] Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu., Rasskazov A.P. Approximation of restored time and temperature dependences of ring laser zero shift. *Elektronnaya tekhnika. Lazernaya tekhnika i optoelektronika*, 1991, no. 2, pp. 49–52 (in Russ.).
- [2] Kolbas Yu.Yu., Ladonkina M.V., Solov'yeva S.I. Drift of Zeeman laser gyroscope with switched longitudinal modes of generations. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2015, no. 3, pp. 35–46 (in Russ.).
- [3] Kolbas Yu.Yu., Grushin M.E., Gorshkov V.N. The nonmagnetic component of the zero bias of a Zeeman laser gyroscope. *Quantum Electron.*, 2018, vol. 48, no. 3, pp. 283–289 (in Russ.). DOI: 10.1070/QEL16509
- [4] Vakhitov N.G., Golyaev Yu.D., Dronov I.V., et al. Zeeman laser gyro with switching of longitudinal modes of generation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2014, no. 2, pp. 10–27 (in Russ.).
- [5] Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu. Descretisation error of input signal in ring laser with periodic support. *ZhTF*, 1991, vol. 17, no. 8, pp. 162–165 (in Russ.).
- [6] Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu. Application of ring lasers to determine the directions to the poles of Earth's rotation. *Quantum Electron.*, 2012, vol. 42, no. 10, pp. 949–952. DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014898
- [7] Kolbas Yu.Yu., Saveliev I.I., Khokhlov N.I. Effect of external and internal magnetic fields on the bias stability in a Zeeman laser gyroscope. *Quantum Electron.*, 2015, vol. 45, no. 6, pp. 573–581. DOI: 10.1070/QE2015v045n06ABEH015538

Kolbas Yu.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Deputy Chief, JSC “Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh” (Vvedenskogo ul. 3, korp. 1, Moscow, 113742 Russian Federation).

Ivanov M.A. — Head of the Laboratory, JSC “Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh” (Vvedenskogo ul. 3, korp. 1, Moscow, 113742 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kolbas Yu.Yu., Ivanov M.A. An improved algorithm for mathematical correction of the zero drift of the zeeman laser gyro with switching longitudinal mode of generation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 2, pp. 91–103 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-2-91-103

	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография авторов А.А. Добрякова, А.П. Карпенко, Е.В. Смирновой</p> <p>«Ментально-структурированная образовательная технология»</p> <p>В книге намечены пути улучшения качества обучения и повышения эффективности профессиональной деятельности специалистов инженерного профиля. В качестве основного средства решения этих задач предложена ментально-структурированная образовательная технология, позволяющая целенаправленно формировать не только фундаментальные знания, умения и навыки обучающихся, но и составляющие их мыслительной грамотности (знаниевая, или познавательная, функциональная, креативная, корпоративная и социально-экономическая грамотность). Эта же технология помогает в воспитании разнохарактерных профессионально значимых личностных качеств обучающегося. Исследована возможность создания информационно-коммуникационной обучающей среды, обеспечивающей поддержку гармонизированного (ментально-структурированного) обучения, ориентированного на использование интеллектуально-дидактических возможностей ЭВМ.</p> <p>Для специалистов, занимающихся проблемами высшей школы, научно-педагогических работников.</p> <p>По вопросам приобретения обращайтесь: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru http://baumanpress.ru</p>