РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 3, с. 93–102

___ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 621.383/537.632.4 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.93.102

Активная компенсация магнитной погрешности волоконно-оптических гироскопов

на основе магниторезистивных чувствительных элементов

А.Б.Грабов, *ntc2@npoit.ru*

АО «НПО измерительной техники», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Е.В. Ковалева, ntc2@npoit.ru

АО «НПО измерительной техники», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

В.И. Суханов, npoit@npoit.ru

АО «НПО измерительной техники», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки активных систем компенсации магнитной погрешности для волоконно-оптических гироскопов. На основе линейной модели магнитной погрешности, возникающей за счет магнитооптических эффектов Фарадея и Керра в сердцевине волокна, предложена схема реализации активной системы компенсации.

Приведены результаты экспериментальной отработки воздействия внешнего поля на волоконный гироскоп для определения требований к разрешающей способности магнитометрического датчика системы компенсации.

Авторами предложена конструкция трехкомпонентного датчика, построенного на основе анизотропного магниторезистивного чувствительного элемента. Датчик монтируется на плату электроники волоконного гироскопа методом «кристалл/на плате» и обеспечивает разрешение не хуже 0,22 мкТл. Приведены характеристики магниторезистивного чувствительного элемента.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, магнитное поле, анизотропное магнитосопротивление

Active Magnetic Error Compensation for Fiber-Optical Gyroscopes Based on Magnetoresistive Sensors

A. B. Grabov, npoit@npoit.ru

Joint Stock Company "Scientific, Research & Production Corporation of Measuring Equipment", Korolev, Moscow Region, Russian Federation

E. V. Kovaleva, ntc2@npoit.ru

Joint Stock Company "Scientific, Research & Production Corporation of Measuring Equipment", Korolev, Moscow Region, Russian Federation

V. I. Sukhanov, npoit@npoit.ru

Joint Stock Company "Scientific, Research & Production Corporation of Measuring Equipment", Korolev, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. Design of active systems for compensating the magnetic error for fiber-optic gyroscopes is considered. A solution for implementing an active compensation system is proposed on the basis of a linear model of the magnetic error arising due to the magneto-optical Faraday and Kerr effects in the fiber core.

The results of experimental testing of the effect of an external field on the fiber gyroscope to determine the requirements for the resolution of the magnetometric sensor of the compensation system are presented.

The authors have proposed a design of a three-component sensor based on an anisotropic magnetoresistive sensor. The sensor is mounted on the board of the fiber gyroscope electronics by the crystal on circuit method and provides a resolution not worse than 0.22 μ T. The characteristics of the magnetoresistive sensitive element are presented.

Keywords: fiber optic gyroscope, magnetic field, anisotropic magnetoresistance

Введение

Датчики угловой скорости на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) являются важным компонентом современных малогабаритных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) космических аппаратов (КА). В волоконнооптических гироскопах отсутствуют движущиеся части, принцип их работы основан на эффекте Саньяка в волоконно-оптическом контуре (ВОК), поэтому такие гироскопы относят к изделиям твердотельной фотоники.

Современные массово выпускаемые в России ВОГ, как правило, относятся к среднему и тактическому классу точности (диапазон дрейфа $\Delta \sim 0,1-1,0^{\circ}/4$) [1]. В настоящее время в России ведется разработка ВОГ точностью до 0,01 $^{\circ}/4$. Зарубежные аналоги ВОГ достигают значений дрейфа нулевого сигнала менее 0,001 $^{\circ}/4$ (фирмы Harris Space & Navigation, Honeywell Inc).

Точность ВОГ в значительной мере определяется наличием невзаимных эффектов в нем [2]. Невзаимность в оптическом волокне возникает вследствие ряда физических эффектов (термооптический эффект Шюппе, магнитооптический эффект и т.п.). В частности, магнитооптические эффекты Фарадея и Керра поворачивают плоскость поляризации излучения, проходящего через контур, что создает паразитную чувствительность ВОГ к внешнему магнитному полю, выражающуюся в магнитооптическом сдвиге нуля. Поскольку КА, на которые устанавливаются БИНС на основе ВОГ, не выходят за границы магнитосферы Земли, то внешнее магнитное поле неизбежно будет источником существенной дополнительной погрешности для выходного сигнала ВОГ. Кроме этого, в условиях космического полета возникают постоянные и переменные магнитные поля иного происхождения, например, вследствие воздействия электрических токов в цепях бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и систем энергоснабжения КА, движущихся магнитных масс в узлах и компонентах КА, плазменных струй двигательных установок. В этих случаях величина магнитной погрешности становится неопределенной, и для повышения точности ВОГ требуется разработать специальные методы защиты ВОК от магнитных полей.

Такая защита может быть как пассивной, например, путем помещения ВОГ в магнитоэкранирующий бокс [3], так и активной — при помощи специальных электронных активных схем компенсации магнитной погрешности (АСКМ) [4]. Хотя пассивная защита ВОГ, в отличие от АСКМ, не требует дополнительного энергопотребления, она существенно увеличивает массу и габариты БИНСов, т. к. магнитоэкранирующий бокс изготавливается, как правило, из относительно толстого листа пермаллоя и должен быть как минимум трехслойным. Кроме этого, существует опасность возникновения неконтролируемых наведенных полей в материале бокса, поскольку невозможно контролировать реальную магнитную обстановку в области ВОК. Поэтому для высокоточного ВОГ для БИНС КА активная компенсация предпочтительнее, чем экранирование.

Модель погрешности ВОГ, обусловленной воздействием магнитного поля

В работе [2] была предложена общая модель погрешностей ВОГ при наличии магнитного поля с напряженностью $\overline{H}_M \{\overline{H}_X, \overline{H}_Y, \overline{H}_Z\}$:

$$\begin{aligned} \Delta \omega(H_M) &= \\ &= \omega_\beta + \omega_x(H_X) \frac{H_X}{H_E} + \omega_y(H_y) \frac{H_y}{H_E} + \omega_z(H_z) \frac{H_z}{H_E}, \end{aligned} \tag{1}$$

где ω_β — составляющая скорости дрейфа, не зависящая от магнитного поля;

 $H_X,\ H_Y,\ H_Z$ — проекции вектора напряженности магнитного поля h_m на оси ОX, ОY и OZ прибора;

H_E = 100 мкТл — нормирующий множитель, близкий к значению напряженности магнитного поля Земли;

 $\omega_x, \, \omega_y, \, \omega_z$ — коэффициенты влияния магнитного поля на скорость дрейфа ВОГ (удельная составляющая скорости дрейфа).

Величина $\omega_{x,y,z}$ по большей части связана с фундаментальными магнитооптическими эффектами — эффектом Фарадея и эффектом Керра — и имеет две основные составляющие [5]:

 – фарадеевскую невзаимность, обусловленную продольной скруткой волокна и действующую в плоскости катушки ВОГ;

 нефарадеевскую магнитно-индуцированную невзаимность, действующую перпендикулярно плоскости катушки ВОГ.

Для первого случая величина погрешности ВОГ $\omega_{x,y,z}$ пропорциональна напряженности магнитного поля H и магнитооптическому коэффициенту φ_{\perp} , и имеет вид:

$$\omega_{x,y,z}(H_{x,y,z}) = \frac{\varphi_{\perp} H_{x,y,z}}{T_{\text{BOF}}},$$
(2)

где $T_{\rm BO\Gamma}$ — постоянная прибора.

Mагнитооптический коэффициент φ_{\perp} для монохроматического излучения также зависит от напряженности магнитного поля $H_{X,Y,Z}$ и длины оптического пути l:

$$\varphi_{\perp} = v H_{x,y,z} l, \tag{3}$$

где *v* — постоянная Верде, константа материала сердцевины волокна, в общем случае определяемая из известного соотношения (например, [5] и [6]):

$$v = \frac{2\pi N_e q^3}{nm^2 c^2} \frac{\omega^2}{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2}.$$
 (4)

Здесь N_e — концентрация электронов, q — заряд электронов, n — двулучепреломление сердцевины, m — масса электрона, c — скорость света, $\omega \ll \omega_0$ — электронная полоса поглощения материала сердцевины, выраженная через круговую частоту.

Учитывая, что для ВОГ $l = 2\pi r N_T$, где r — радиус ВОК, N_T — число витков, формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$\Delta\omega(H_M) = \omega_\beta + \frac{2\pi}{T_{\rm BOF}} \frac{\nu r N_T}{H_E} (H_x^3 + H_y^3 + H_z^3).$$
(5)

Оценка параметров магнитооптического сдвига нуля ВОГ

Ранее была проведена экспериментальная оценка магнитооптического сдвига нуля ВОГ, применяемого в БИНС КА «Фобос-Грунт» [7]. В данном ВОГ



Рис. 1. Установка ВОГ на платформе поворотного столика стенда компенсации геомагнитного поля

используется ВОК, длина волокна которого составляет 500 м.

Дрейф нуля может быть оценен экспериментально путем моделирования изменения внешнего магнитного поля на стенде с активной компенсацией геомагнитного поля (рис. 1). Стенд содержит:

– две катушки Гельмгольца \emptyset 680 мм, расстояние между катушками l = 300 мм, внутри которых устанавливается немагнитный поворотный столик на колонне, обеспечивающей вращение на 360° вокруг осей X, Y, Z с разрешением $\pm 0.2^{\circ}$;

прецизионный источник тока типа PWS4205
 с минимальным разрешением ±0,1 мА;

– феррозондовый магнитометр типа HB.0204.62A с разрешением $\pm 0,1$ мкТл в диапазоне $\pm 200,0$ мкТл и выходом на ПК (рис. 2).

В ходе работы ВОГ устанавливался на платформу стенда активной компенсации в непосредственной близости от чувствительного элемента магнитометра НВ.0204.62А. Плоскость катушки ВОГ ориентировалась осью чувствительности (перпендикулярно) в направлении «север-юг». Прецизионный источник управлял током в цепи катушек Гельмгольца. По показаниям магнитометра внешнее поле было скомпенсировано полем катушек



Рис. 2. Блок-схема экспериментального стенда для измерения магнитооптического сдвига нуля ВОГ: 1 — ВОГ; 2 — магнитометр; 3 — стенд компенсации магнитного поля; 4 — КПА для снятия данных с ВОГ; 5 — ПК-1; 6 — прецизионный источник тока; 7 — контроллер магнитометра; 8 — ПК-2

с точностью ±0,05 мкТл. Затем величина внешнего поля изменялась в диапазоне от -50 мкТл до +50 мкТл Э с шагом 0,5 мкТл. Изменение выходного сигнала ВОГ фиксировалось с помощью ПК, подключенного с помощью КПА.

ВОГ в зафиксированном относительно поверхности Земли положении выдает сигнал, соответствующий угловой скорости вращения Земли (~15,04107 °/ч). Величина отклонения при заданном магнитном поле характеризует магнитооптический дрейф.

Результат измерения $\Delta\omega(H_{\rm M})$ ВОГ при магнитооптическом сдвиге нуля приведен на рис. 3. Удельная составляющая скорости дрейфа ВОГ составляет $\omega_x = 0,02061 \,^\circ/^{4}/_{\rm MK}$ Тл. В БИНС разработки АО «НПО ИТ» применяются четыре типа ВОГ с контурами длиной 200, 400, 500 и 700 м, изготовленных из оптического волокна с сохранением поляризации (РМ-волокно) типа «эллипс» одного вида. То есть материал сердцевины имеет близкий химический состав и постоянная v изменяется в пренебрежимо малых пределах. Отсюда получим 0,008 $< \omega_x < 0,028 \,^\circ/$ час/мкТл.

При подъеме КА от поверхности Земли до геостационарной орбиты (ГСО) величина напряженно-



Рис. 3. Изменение дрейфа нуля в зависимости от напряженности магнитного поля

сти геомагнитного поля B_h убывает обратно пропорционально кубу высоты:

$$B_{h} = B_{0} \frac{1}{\left(R_{E} + h\right)^{3}},\tag{6}$$

где B_0 — напряженость магнитного поля на уровне моря, R_E — радиус Земли, h — высота орбиты.

Из уравнения (6) получим, что для ГСО ($h = 36\,000$ км) $B_h = 2,2$ мкТл. Эта величина напряженности дает значение $\Delta\omega(H_{\rm M})$ по каждой из осей не менее 0,04 °/ч. То есть при заявленной точности ВОГ 0,1 °/ч магнитная компонента погрешности на ГСО составит более 40%. Исходя из полученного значения B_h разрешающая способность датчика магнитного поля должна быть не менее чем на порядок меньше измеряемого диапазона, то есть не хуже $S^* \sim 0,22$ мкТл.

Блок-схема АСКМ для ВОГ

Блок-схема АСКМ для ВОГ по составу и принципу работы в основных чертах будет воспроизводить описанную в предыдущем разделе схему измерительной установки. АСКМ должна содержать: трехкомпонентный датчик магнитного поля, электронную схему управления, обрабатывающую сигнал с датчика и управляющую компенсирующими устройствами, а также собственно компенсаторы (рис. 4).

В работе [4] предлагалось в качестве датчика магнитного поля использовать искательные катушки или феррозонды, а в качестве компенсаторов — либо три пары катушек Гельмгольца



Рис. 4. Блок-схема активной системы компенсации магнитной погрешности

(X, Y, Z), либо электрооптические ячейки, включенные в оптическую схему ВОГ и поворачивающие плоскость поляризации в противоположную сторону. Первым бросающимся в глаза недостатком этого технического решения является использование искательной катушки. Как показано в разделе «Оценка параметров магнитооптического сдвига нуля ВОГ», величина эффекта Фарадея пропорциональна напряженности поля H_M , а в катушке выходным сигналом является ЭДС индукции, пропорциональная ее изменению ΔH_M . Другими словами, постоянное или достаточно медленно изменяющееся переменное поле даже значительной абсолютной напряженности не вызовет отклика измерительной катушки. Для измерения поля необходимы векторные трехкомпонентные датчики поля, например феррозондовые. Но стандартные для РЭА КА феррозондовые датчики магнитного поля по своим габаритным параметрам и энергопотреблению сравнимы с самими ВОГ.

Таким образом, можно сделать вывод, что для ACKM ВОГ требуется миниатюрный трехкомпонентный датчик магнитного поля, способный измерять постоянное и переменное магнитное поле в диапазоне ± 100 мкТл с разрешением не хуже ± 0.2 мкТл [8].

Магниторезистивный чувствительный элемент для АСКМ

Хорошим альтернативным решением может быть применение чувствительных элементов (ЧЭ), основанных на анизотропном магниторезистивном эффекте (AMP). АМР ЧЭ изготавливаются по микроэлектронной технологии, они миниатюрны (стандартный корпус интегральной микросхемы) и имеют низкое энергопотребление (≤ 10⁻² Вт). АМР-эффект в мягком ферромагнетике имеет теоретический предел обнаружения 10⁻¹² Тл [9].

В АО «НПО ИТ» ранее были разработаны трехкомпонентные АМР ЧЭ магнитного поля ПП-104, а также бортовые магнитометры МРД-09 на их основе [10]. Однако габариты ПП-104 не позволяют напрямую использовать их в АСКМ для БИНС. Поэтому авторы пришли к выводу, что задача активной компенсации погрешности ВОГ может быть решена путем разработки нового специализированного типа трехкомпонентного АМР ЧЭ. ЧЭ для АСКМ может быть создан на базе основных конструктивных и технологических решений, использованных ранее в однокомпонентных ЧЭ МРЧЭ-237 и ММКК-247 [11]. В этом во вновь разрабатываемом ЧЭ необходимо оптимизировать габариты, порог чувствительности и разрешающую способность на диапазон магнитного поля, характерный для магнитных помех в ВОГ.

Оптимизированный ЧЭ для ACKM ВОГ и БИНС получил наименование УЭМР. УЭМР представляет собой планарный кристалл АМР ЧЭ, сформированный на сапфировой подложке и покрытый защитным слоем стеклоэмали [12]. УЭМР имеет площадь кристалла 4,2 × 3,6 мм. Как приведено в [10], «четыре полосковых магниторезистора R1, R2, R3, R4 сформированы из пленки ферромагнитного сплава Ni_{0.76}Fe_{0.18}Co_{0.06} толщиной 25 нм. Резисторы R1, R2, R3, R4 расположены под углом 45° друг к другу и к оси максимальной чувствительности и соединены в мостовую измерительную схему. Также на кристалле в верхних слоях расположены, проводник перемагничивания R_{nn1} и проводник управления R_{nv1} . Наличие проводника управления $R_{\rm ny}$ в составе элемента магниторезистивного позволяет изменять значение начального сигнала мостовой измерительной схемы (балансировка нуля) путем подачи в проводник управления постоянного тока». С целью улучшения технологичности кристалла и обеспечения удобства автоматизированной сборки контактные площадки выведены на периферию кристалла.



Рис. 5. Зависимость изменения чувствительности dS от эффективной площади магниторезистора

Оптимизация геометрической формы полосковых магниторезисторов R1, R2, R3, R4 проводилась исходя из заданной требуемой чувствительности $S^* = 0,22$ мкТл АМР ЧЭ. Параметры магниторезисторов, требуемые для АСКМ ВОГ, определялись из соотношения [9, с. 116]:

$$L(m) = \frac{SH_x}{U_{\text{out}}} = \frac{2JH_b\Delta\rho H_x}{U_{\text{out}}\left(H_k + M\frac{t}{w}\right)^2},\tag{7}$$

где L(m) — суммарная длина магниторезистора, мкм,

J — плотность тока, А/м,

U_{out} — выходной сигнал, В,

 $H_b=0{,}7H_k$ — поле смещения, м Т
л,

 H_k — поле перемагничивания (параметр материала, для $\mathrm{Ni}_{0,76}\mathrm{Fe}_{0,18}\mathrm{Co}_{0,06}$ 1,2 $< H_k <$ 1,6 мТл),

M — намагниченность насыщения, мТл,

T — толщина пленки, Å,

w — ширина полоски, мкм.

Возможные решения для уравнения (7) методом подбора, исходя из типичных параметров H_k , H_b и M для Ni_{0.76}Fe_{0.18}Co_{0.06}, приведены в таблице.

Следует обратить внимание на соотношение S/L. В общем случае S^* должна расти с ростом площади A. Но в реальности прирост чувствительности dS уменьшается с увеличением площади асимптотически, как показано на рис. 5.

Поэтому при выборе топологического решения целесообразно принять компромиссное значение S

до выхода кривой dS/dA на плато. При этом желательно соблюсти условие, чтобы увеличение A не вызвало рост общей площади кристалла. По результатам проведенной оптимизации топологии был изготовлен комплект фотошаблонов и лабораторные образцы AMP ЧЭ УЭМР. Топологическое решение кристалла УЭМР представлено на рис. 6, размер кристалла УЭМР 3,6 × 4,5 мм. Расчетная величина минимального обнаружимого поля H_x составляет 0,2 мкТл, чувствительность $S^* - 12,0$ мВ/мТл В.

По разработанной топологии на сапфировых подложках были изготовлены две пластины диаметром 76 мм, а которых размещались по 230 кристаллов магниторезистивных датчиков УЭМР. Кри-



Рис. 6. Топология магниторезистивного чувствительного элемента УЭМР

АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ МАГНИТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

t, À	a, mkm	A, mm ²	<i>J</i> , мА	w, mkm	$t/w \cdot 10^2$	S, м B /м T л · B	L, мкм	R_b , Ом
250	8	0,500	6,4	11,3	2,21	0,26	1976,2	1397,4
	12	1,000	5,9	17,0	1,47	0,42	3253,0	1533,5
	15	2,000	4,2	21,2	1,17	0,74	5743,8	2166,1
	20	3,000	4,4	28,3	8,83	0,93	7208,2	2038,8
	25	4,000	4,8	35,4	7,07	1,07	8261,3	1869,3
	30	5,000	5,3	42,4	5,89	1,17	9055,1	1707,4
	35	6,000	5,8	49,5	5,05	1,25	9674,8	1563,7

Таблица. Расчетные параметры магниторезисторов

сталлы УЭМР монтировались на тестовые платы, как это показано на рис. 7, тестовые платы устанавливались в соответствующий разъем измерительного модуля ЖГ.7872-7064.



Рис. 7. УЭМР на тестовой плате

Измерительный модуль закреплялся на поворотной платформе стенда ЖГ.7872.6719.000, описанного в разделе «Блок-схема АСКМ для ВОГ». Измерительный модуль ЖГ.7872-7064 формировал в катушке $R_{\rm пп}$ последовательность прямоугольных импульсов тока Set-Reset амплитудой 2А и длительностью 100 мс. В катушке стенда ЖГ.7872.6719.000 формировалось постоянное маг-

нитное поле, направленное вдоль оси чувствительности кристалла (рис. 8). Напряженность измерительного поля регулировалась в диапазонах от $\pm 0,05$ мТл до $\pm 0,70$ мТл с шагом 5 мкТл. Для всех кристаллов измерялись сопротивления проводников, токи утечки и величина чувствительности при $V_{\text{пит}} = 5$ В. Для всех исследуемых кристаллов были получены функции преобразования в диапазоне $\pm 0,2$ мТл при комнатной температуре. Функции преобразования имеют линейный вид, характеристическое значение чувствительности УЭМР составляет $S = 10,56 \pm 0,05$ мВ/В мТл. Функции преобразования кристаллов УЭМР приведены на рис. 9.

Определение области линейности производилось путем последовательного расширения диапазона изменения магнитного поля в измерительном соленоиде стенда в диапазонах от $\pm 0,5$ Гаусс до $\pm 7,0$ Гаусс с шагом 0,1 Гаусс. Для каждого измерения рассчитывались коэффициент чувствительности S и величина относительной ошибки измерения dU (%), характеризующей в данном случае точность измерения поля. Вид кривой распределения ошибок для разных диапазонов измерения магнитного поля показан на рис. 10. Зависимость величины ошибки от диапазона поля приведена на рис. 11.

Миниатюрный трехкомпонентный датчик на основе трех УЭМР может быть встроен непосредственно на плату блока электроники ВОГ. Встроен он может быть как минимум двумя способами:

два кристалла УЭМР с осями чувствительности, развернутыми на 90° друг относительно друга, монтируются методом «кристалл-на-плате» с золотыми межсоединениями, а третий УЭМР



Рис. 8. Схема измерения функций преобразования и области линейности УЭМР



Рис. 9. Вид функций преобразования кристаллов магниторезистивных датчиков магнитного поля УЭМР в диапазоне ±0,2 мТл

также методом «кристалл-на-плате» устанавливается на дополнительную переходную плату размером 6×9 мм, которая в свою очередь вертикально устанавливается на основной плате блока электроники (рис. 12, *a*);



Рис. 10. Зависимость величины ошибки измерения от измеряемого диапазона магнитного поля для магниторезистивного датчика УЭМР

– все три УЭМР устанавливаются на переходные платы, причем у двух кристаллов ось чувствительности направлена вдоль длинной стороны платы, а у третьего — вдоль короткой. Переходные платы монтируются вертикально на основной плате, образуя в плане П-образную фигуру (рис. 12, б). При таком способе размещения З УЭМР занимают



Рис. 11. Изменение чувствительности кристалла УЭМР при расширении диапазона измерения магнитного поля от ±0,05 мТл до ±0,7 мТл





Рис. 12. Варианты изготовления трехкомпонентного датчика на основе УЭМР методом «кристалл-на-плате»

на плате меньшую площадь, чем при размещении первым способом.

Таким образом обеспечивается трехкомпонентная чувствительность, направленная вдоль осей X, Y и Z при достаточно хорошей механической прочности конструкции сборки. Возможность монтажа трехкомпонентного AMP ЧЭ непосредственно на плату блока электроники ВОГ привела к разработке нового, алгоритмического способа компенсации магнитной погрешности. Данные измерений УЭМР напрямую вводятся в АЦП блока электроники ВОГ, и вычислительный модуль на основе эмпирической модели рассчитывает требуемую поправку и вносит ее в конечный результат.

Выводы

Доля магнитооптических эффектов может составлять до 40% от общей величины дрейфа ВОГ среднего класса точности. Экспериментальная отработка модели показала, что коэффициент влияния магнитного поля на дрейф для гироскопов среднего и тактического класса точности имеет величину 0,008 $< \omega_r < 0,028$ °/ч/мкТл. Снизить влияние магнитооптических эффектов без увеличения массы прибора позволяет активная система компенсации магнитного поля. Для активной системы компенсации требуется трехкомпонентный датчик магнитного поля с разрешением не хуже 0,22 мкТл. Такой разрешающей способностью обладает анизотропный магниторезистивный чувствительный элемент с оптимизированной топологией УЭМР. УЭМР монтируется методом «кристалл-наплате» непосредственно в блок электроники гироскопа и позволяет определить величину поправки на магнитную помеху.

Список литературы

- Пестунов А.Н., Ковалева Е.В. Разработка канала измерения угловой скорости на основе цифрового волоконно-оптического гироскопа // Ракетнокосмическое приборостроение, 2017, т. 4, вып. 1. С. 78–83.
- 2. Антонова М.В., Матвеев В.А. Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа при воздействии тепловых и магнитных полей // Вестник

МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия «Приборостроение», 2014, № 3. С. 73-80.

- 3. Патент № US5, 896,199. High efficiency magnetic shield for a fiber optic gyroscope: Apr. 20,1999 / John G. Mark, Daniel A. Tazartes, Amado Cordova, Agop H. Cherbettchian, Eric L. Goldner; патентообладатель "Litton Systems Inc.". 6 p.
- 4. Патент № US7, 298,491. Magnetic compensators for fiber optic gyroscopes: Nov. 20, 2007 / Matthew A. Olson, Charles H. Lange; патентообладатель "Honeywell International Inc.". 12 р.
- Urakseev M., Levina T., Filippov V., Daradkeh Y.I. Mathematical Modeling of the Fiber-Optic Converter on the Magneto-Optical Faraday Effect // International Journal of Open Information Technologies, 2017, vol. 5, No. 9. P. 53–56.
- Chen L., Zhao Y. X., Yang M. F. et al. Cross-coupling drift between magnetic field and temperature in depolarized interferometric fiber optic gyroscope // OPTICS EXPRESS, 2019, vol. 27, No. 5. P. 6003– 6011.
- Михеева А.А., Грабов А.Б., Пестунов А.Н., Суханов В.И. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от напряженности магнитного поля // Отраслевая научно-

техническая конференция «Информационно-управляющие и измерительные системы-2016. Королев, 2016. 135 с.

- Патент на полезную модель № 193692 Российской Федерации. Магнитный компенсатор для волокнооптического гироскопа / Грабов А.Б., Ковалева Е.В., Суханов В.И.; патентообладатель ОАО «НПО измерительной техники». 4 с.
- 9. *Tumanski S.* Thin Film Magnetoresistive Sensors. IOP Publishing Ltd, 2001. 441 p.
- Грабов А.Б., Бродин Е.В., Веселов А.В., Суханов В.И. МРД-009 и МРД-010-магниторезистивные бортовые интеллектуальные магнитометры для КА // Авиакосмическое приборостроение, 2015, No 6. C. 14–21.
- Суханов В. И., Грабов А. Б. Тонкопленочные магниторезистивные датчики и измерительные преобразователи магнитной индукции // Информационнотехнологический вестник, 2018, № 2 (16). С. 35–44.
- Патент № 2495514 Российской Федерации. Магниторезистивный датчик: № 2012118207: заявл. 03.05.2012: опубл. 10.10.2013 / Ажаева Л. А., Веселов А. В., Грабов А. Б., Касаткин С. И., Сергеева Л. В., Суханов В. И.; патентообладатель ОАО «НПО измерительной техники». 8 с.