

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2026. Т. 34, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2026;34(5)

Научная статья
УДК 53.06, 537

DOI: 10.18500/0869-6632-003231
EDN: JATIBQ

Векторный измеритель геомагнитных полей на основе бинарных модулей ЖИГ-генераторов

В. В. Тихонов, А. С. Пташенко[✉], С. В. Гришин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: tvlad4@yandex.ru, ✉andrey.po3@mail.ru, sergrsh@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.05.2026, принята к публикации 28.07.2026,
опубликована онлайн 12.08.2026, опубликована 30.09.2026

Аннотация. Цель. Разработка физических принципов построения высокочувствительных термнезависимых векторных измерителей слабых геомагнитных полей, состоящих из трех идентичных однокоординатных сенсоров геомагнитных полей, ориентированных по осям трехмерного базиса. Методы. В качестве первичных преобразователей геомагнитных полей предлагается использовать бинарные модули, состоящие из двух автогенераторов сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, в цепи обратной связи которых содержатся идентичные резонаторы, выполненные на основе пленки железомитрицевого граната (ЖИГ). ЖИГ-резонаторы намагничены в противоположных направлениях по нормали к поверхности пленки. Сигналы с выходов ЖИГ-генераторов поступают на входы смесителя, где выделяется разностная частота СВЧ-сигналов. Разностная частота измеряется цифровым частотомером. При наложении внешнего геомагнитного поля возникает сдвиг разностной частоты, который адекватно отражает величину только одной нормальной составляющей геомагнитного поля, совпадающей с направлением базового намагничивания ЖИГ-резонаторов. При этом сдвиги частот, вызванные касательными составляющими поля, а также температурным нагревом ЖИГ-резонаторов, полностью компенсируются. Результаты. Предложена оригинальная конструкция портативной системы базового намагничивания пленочных ЖИГ-резонаторов. Проведены предварительные испытания лабораторного макета ЖИГ-генератора в составе портативной системы базового намагничивания. Испытания проводились на прецизионном поворотном стенде. Показано, что порог ориентационной (угловой) чувствительности ЖИГ-генератора не превышает 0.012 град. Заключение. Предлагаемая методика векторных измерений геомагнитных полей отличается простотой, надежностью и технологичностью. Она может применяться в системах высокоточной геомагнитной навигации, а также в системах мониторинга геомагнитной обстановки для проведения научно-исследовательских, картографических и геолого-разведывательных работ.

Ключевые слова: пленочный ЖИГ-резонатор, ЖИГ-генератор, геомагнитное поле, векторное измерение геомагнитных полей.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-30027).

Для цитирования: Тихонов В. В., Пташенко А. С., Гришин С. В. Векторный измеритель геомагнитных полей на основе бинарных модулей ЖИГ-генераторов // Известия вузов. ПНД. 2026. Т. 34, № 5. С. 654–664. DOI: 10.18500/0869-6632-003231. EDN: JATIBQ

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Vector geomagnetic field meter based on binary modules of YIG generators

V. V. Tikhonov, A. S. Ptashenko✉, S. V. Grishin

Saratov State University, Russia

E-mail: tvlad4@yandex.ru, ✉andrey.po3@mail.ru, sergrsh@yandex.ru

Received 29.05.2026, accepted 28.07.2026, available online 12.08.2026, published 30.09.2026

Abstract. *Purpose.* Development of physical principles for constructing highly sensitive, thermally independent vector meters of weak geomagnetic fields, comprising three identical single-coordinate geomagnetic field sensors oriented along the axes of a three-dimensional basis. *Methods.* As primary transducers of geomagnetic fields, it is proposed to use binary modules consisting of two microwave (MW) autogenerators, whose feedback circuits contain identical resonators fabricated from yttrium iron garnet (YIG) films. The YIG resonators are magnetized in opposite directions along the normal to the film surface. Signals from the YIG generator outputs are fed to a mixer input, where the difference frequency of the microwave signals is extracted. This difference frequency is measured by a digital frequency counter. When an external geomagnetic field is applied, a shift in the difference frequency occurs that adequately reflects the magnitude of only one normal component of the geomagnetic field, aligned with the direction of the bias magnetization of the YIG resonators. Meanwhile, frequency shifts caused by tangential field components, as well as those induced by thermal heating of the YIG resonators, are completely compensated. *Results.* An original design of a portable bias magnetization system for thin-film YIG resonators is proposed. Preliminary tests of a laboratory YIG generator prototype integrated with the portable bias magnetization system have been carried out on a precision rotary stage. It is demonstrated that the orientation (angular) sensitivity threshold of the YIG generator does not exceed 0.012° . *Conclusion.* The proposed technique for vector measurements of geomagnetic fields is characterized by simplicity, reliability, and technological feasibility. It can be applied in high-precision geomagnetic navigation systems, as well as in geomagnetic environment monitoring systems for scientific research, cartographic, and geological exploration purposes.

Keywords: film YIG resonator, YIG generator, geomagnetic field, vector measurement of geomagnetic fields.

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Project No. 23-79-30027).

For citation: Tikhonov VV, Ptashenko AS, Grishin SV. Vector geomagnetic field meter based on binary modules of YIG generators. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2026;34(5):654–664. DOI: 10.18500/0869-6632-003231

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

В последние годы особую актуальность приобретают системы геомагнитной навигации, которые нашли широкое применение в различных отраслях хозяйственной деятельности, включая геодезию, метеорологию, картографию, экологию, сельское и лесное хозяйство, логистику и многое другое. Для таких систем требуется создание высокоточных векторных измерителей магнитных полей в диапазоне $0...0.5$ Э.

В настоящее время на рынке представлено множество измерителей магнитных полей, которые широко применяются в машиностроении, геофизике, медицине и т. д. [1–3]. В зависимости от сферы применения используются различные типы сенсоров магнитных полей. Для измерения сильных полей (1 Гс...10 кГс) используются датчики Холла [4], электромеханические [5] и пьезоэлектрические датчики [6]. Для измерения средних полей (0.01...10 Гс) используются магниторезистивные [7] и магниторезонансные (протонные) преобразователи [8]. Для измерения слабых полей ($10^{-6}...0.1$ Гс) используются феррозондовые преобразователи [8]. Для измерения сверхслабых полей ($10^{-11}...10^{-5}$ Гс) используют квантовые SQUID-магнитометры [9].

Однако перечисленные сенсоры магнитных полей не в полной мере отвечают требованиям геомагнитной навигации. SQUID-магнитометры обладают непревзойдённой чувствительностью, но их верхняя граница динамического диапазона существенно ниже магнитного поля Земли.

К тому же они требуют охлаждения до криогенных температур, громоздки и сложны в использовании. Наиболее близкими по чувствительности являются феррозондовые преобразователи, но и они достаточно сложны и трудоёмки.

В настоящее время разрабатываются новые принципы измерения магнитных полей. В перспективе конкуренцию феррозондовым преобразователям может составить высокочувствительный магнитометр на основе магнитоэлектрического эффекта в слоистой структуре ферромагнетик–пьезоэлектрик [10]. Разрабатываются высокочувствительные сенсоры магнитных полей на основе интерферометра спиновых волн [11]. Исследуются возможности применения высокودобротных ЖИГ-резонаторов, частоты которых сильно зависят от величины и направления намагничивающих полей [12–14]. Это направление интересно тем, что позволяет с высокой точностью измерять величину приложенного поля в единицах измерения частоты резонатора. Однако для практического использования ЖИГ-резонаторов требуется решение проблем температурной стабильности.

В данной работе исследуется возможность создания векторных измерителей геомагнитных полей на основе высокочувствительных термoneзависимых однокоординатных сенсоров геомагнитных полей, выполненных в виде бинарных модулей микроволновых автогенераторов с пленочными ЖИГ-резонаторами в цепи обратной связи.

1. Методика измерений

Принцип действия однокоординатного сенсора геомагнитных полей иллюстрируется блок-схемой на рис. 1. В состав однокоординатного сенсора входит бинарный модуль, состоящий из двух автогенераторов СВЧ 1, 2 с частотоподающими элементами в виде пленочных ЖИГ-резонаторов, смесителя сигналов 3, выделяющего разностную частоту от двух сигналов автогенераторов, и частотомера с контроллером 4, осуществляющего измерение разностной частоты и пересчет измеренной частоты в единицы измерения магнитной индукции.

В исходном состоянии (при отсутствии внешних геомагнитных полей) ЖИГ-резонаторы намагничены по нормали к поверхности пленок так, что базовые намагничивающие поля равны по величине $|\vec{H}_{01}| = |\vec{H}_{02}|$ и направлены в противоположные стороны $\vec{H}_{01} \uparrow \downarrow \vec{H}_{02}$. При этом частоты первых резонансных мод прямых объемных магнитостатических волн равны по величине $f_1 = f_2$ и практически совпадают с частотами ферромагнитного резонанса

$$f_1 = \gamma [H_{01} - 4\pi M(T)], \quad f_2 = \gamma [H_{02} - 4\pi M(T)], \quad (1)$$

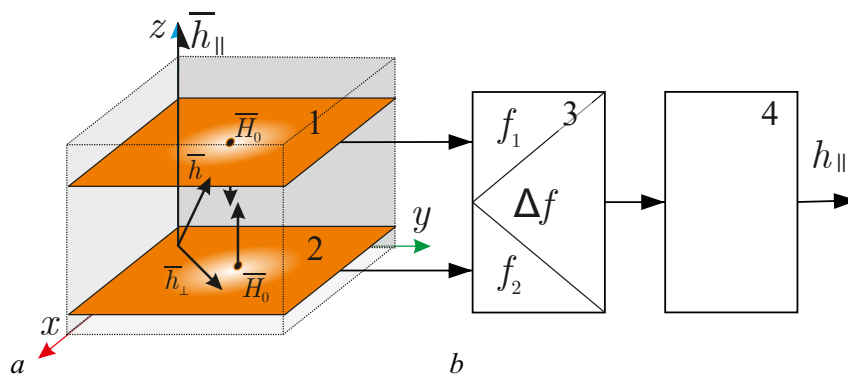


Рис. 1. Блок-схема однокоординатного сенсора геомагнитных полей. Пунктиром выделен первичный модуль, состоящий из двух ЖИГ-генераторов 1, 2, смесителя сигналов 3 и контроллера 4 (цвет онлайн)

Fig. 1. Block diagram of a single-coordinate geomagnetic field sensor. The dotted line indicates the primary module, consisting of two YIG-generators 1, 2, a signal mixer 3, and a controller 4 (color online)

где $\gamma = 2.8 \text{ МГц/Э}$ — гиромагнитное отношение, $M(T)$ — зависящая от температуры намагниченность пленки ЖИГ.

При наложении слабого геомагнитного поля $|\vec{h}| \ll |\vec{H}_{01}|, |\vec{H}_{02}|$, где $\vec{h} = \vec{h}_{\parallel} + \vec{h}_{\perp}$, $\vec{h}_{\parallel} \parallel \vec{H}_{01}, \vec{H}_{02}$ и $\vec{h}_{\perp} \perp \vec{H}_{01}, \vec{H}_{02}$ соответственно нормальная и касательная к поверхности пленки составляющие геомагнитного поля, возникают сдвиги частот ЖИГ-резонаторов на величины $\Delta f_1 = f_1^{\parallel} + f_1^{\perp}$, $\Delta f_2 = f_2^{\parallel} + f_2^{\perp}$. При этом нормальная составляющая геомагнитного поля $h_{\parallel}$ вызывает равные по величине и противоположные по направлению сдвиги частот

$$f_1^{\parallel} = \gamma [\pm h_{\parallel} - 4\pi M_0(T)], \quad f_2^{\parallel} = \gamma [\mp h_{\parallel} - 4\pi M_0(T)]. \quad (2)$$

Касательная составляющая поля $h_{\perp}$ также вызывает сдвиги частот, равные по величине, но направленные в одну и ту же сторону

$$f_1^{\perp} = \gamma [\pm h_{\perp} - 4\pi M_0(T)], \quad f_2^{\perp} = \gamma [\pm h_{\perp} - 4\pi M_0(T)]. \quad (3)$$

При этом температурные сдвиги частот $f_1^T(\Delta T)$, $f_2^T(\Delta T)$ также равны по величине и направлены в одну и ту же сторону.

При выделении разностной частоты сдвиги частот, вызванные нормальной составляющей геомагнитного поля $h_{\parallel}$, суммируются $\Delta f^{\parallel} = f_1^{\parallel} + f_2^{\parallel}$, а сдвиги частот, вызванные касательной составляющей $h_{\perp}$, вычитаются $\Delta f^{\perp} = \Delta f_1^{\perp} - \Delta f_2^{\perp} = 0$ и полностью компенсируются. Точно так же компенсируются температурные сдвиги частот $f_1^T(\Delta T) - f_2^T(\Delta T) = 0$.

В итоге ненулевой остается только одна разностная частота $\Delta f = \Delta f^{\parallel}$, связанная с нормальной составляющей геомагнитного поля $h_{\parallel}$ простым соотношением $\Delta f = \pm 2\gamma h_{\parallel}$, а искомая составляющая геомагнитного поля рассчитывается по формуле

$$h_{\parallel} = h_z = \pm \frac{\Delta f}{2\gamma}. \quad (4)$$

Согласно расчетам по формуле (4), при измерении разностной частоты с точностью $\Delta f = 0.1 \text{ Гц}$, теоретический предел чувствительности однокоординатных сенсоров геомагнитных полей может достигать $h_{\parallel} \approx 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ Э}$.

Указанная оценка получена из паспортного разрешения частотомера в предположении отсутствия магнитных шумов и неограниченного времени накопления; реальная чувствительность макета определяется уровнем фазовых шумов генератора и магнитных шумов окружающей среды и является предметом дальнейших исследований. При этом ориентационная (угловая) чувствительность сенсора может достигать значений $h_{\parallel}/0.5 \text{ Э} \approx 2 \cdot 10^{-6}^\circ$.

Для измерения векторных характеристик геомагнитного поля достаточно трех идентичных однокоординатных сенсоров, ориентированных по осям трехмерного базиса, как показано на рис. 2.

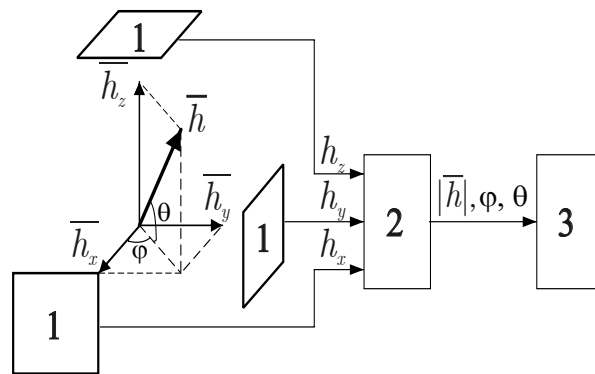


Рис. 2. Блок-схема векторного измерителя геомагнитных полей: 1 — однокоординатный геомагнитный сенсор; 2 — микропроцессор; 3 — индикатор

Fig. 2. Block diagram of a vector geomagnetic field meter: 1 — single-coordinate geomagnetic sensor; 2 — microprocessor; 3 — indicator

Сенсоры 1 предназначены для измерения координатных составляющих вектора геомагнитного поля $\vec{h} = (h_x, h_y, h_z)$, при помощи микропроцессора 2 рассчитываются модуль $|\vec{h}| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2}$, полярный $\varphi = \arcsin(h_z/\sqrt{h_x^2 + h_y^2})$ и азимутальный угол геомагнитного поля $\theta = \arctan(h_z/\sqrt{h_x^2 + h_y^2})$.

2. Эксперимент

На рис. 3 представлен вариант конструкции бинарного модуля однокоординатного сенсора геомагнитных полей.

В состав модуля входит портативная система базового намагничивания пленочных ЖИГ-резонаторов (рис. 3, а) с установленными платами ЖИГ-генераторов (рис. 3, б). Система намагничивания состоит из трех параллельных стальных пластин (полюсов магнитной системы) 1 и четырех постоянных магнитов 2, установленных в зазорах пластин и присоединенных одноименными полюсами к внутренней стальной пластине. Постоянные магниты создают встречные потоки магнитной индукции, которые суммируются во внутреннем полюсе, далее разделяются пополам и замыкаются в рабочих зазорах магнитной системы. При этом в рабочих зазорах наводятся равные по величине и противоположно направленные магнитные поля, ориентированные по нормали к поверхностям пленочных ЖИГ-резонаторов 4, установленных на микрополосковых платах ЖИГ-генераторов 3.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования магнитных полей в портативной системе базового намагничивания пленочных ЖИГ-резонаторов. На рис. 4, а представлено распределение магнитных потоков в рабочих зазорах, полюсах магнитной системы и в окружающем пространстве. На рис. 4, б представлены графики напряженности магнитных полей, рассчитанные в точках рабочих зазоров, расположенных на красных линиях 1, 2.

Расчеты проводились методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе Ansoft Maxwell SV. Исходными данными расчета являлись магнитные свойства и геометрические размеры элементов магнитной системы. В расчетах использовались неодимовые магниты марки N35 с остаточной индукцией 11.2 кГс и торцевыми размерами 5 мм × 2 мм, магнитные полюсы из прецизионного сплава марки 79НМ с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 10^5$ и торцевыми размерами 20 мм × 2 мм. Толщины рабочих зазоров определялись толщинами

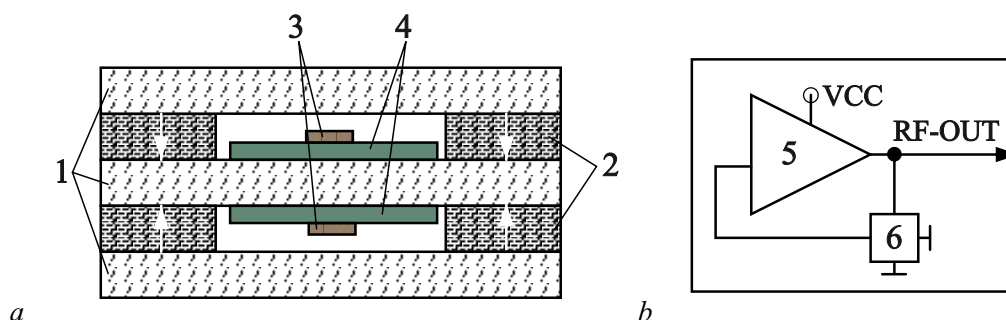


Рис. 3. Первичный модуль однокоординатного сенсора геомагнитных полей: а — конструкция системы базового намагничивания ЖИГ-резонаторов (1 — стальные полюсы, 2 — постоянные магниты, стрелками показано направление остаточной намагниченности, 3 — платы ЖИГ-генераторов, 4 — ЖИГ-резонаторы); б — схема ЖИГ-генератора (5 — малошумящий СВЧ-усилитель, 6 — ЖИГ-резонатор) (цвет онлайн)

Fig. 3. Primary module of a single-coordinate geomagnetic field sensor: а — design of the basic magnetization system of YIG resonators (1 — steel poles, 2 — permanent magnets, the arrows indicate the direction of residual magnetization of the permanent magnets, 3 — YIG generator boards, 4 — YIG resonators); б — schematic of a YIG generator (5 — low-noise microwave amplifier, 6 — YIG resonator) (color online)

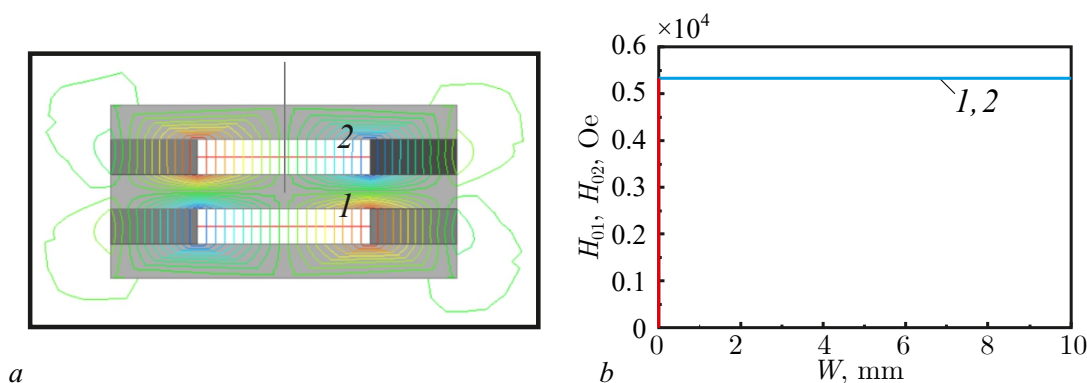


Рис. 4. Картина распределения магнитных потоков портативной магнитной системы (а) и топология магнитных полей в рабочих зазорах 1, 2 (b) (цвет онлайн)

Fig. 4. The inset shows the magnetic flux distribution of the portable magnetic system (a) and magnetic field topology in working gaps 1 and 2 (b) (color online)

постоянных магнитов 2 мм, ширина рабочего зазора определялась расстоянием между постоянными магнитами 10 мм.

На графиках рис. 4, b хорошо видно, что при заданных параметрах системы магнитные поля в рабочих зазорах строго совпадают по величине, достигая значений 5.4 кГс, и характеризуются исключительно высокой однородностью. Указанное значение относится к портативной системе постоянных магнитов и отличается от поля, использованного при автономном измерении S21-параметров резонатора (см. рис. 6). Различие обусловлено тем, что в макете генератора резонатор расположен в зазоре магнитной системы, тогда как при снятии S21-параметров применялся внешний электромагнит с иным зазором. Это обеспечивало равенство частот возбуждения ЖИГ-генераторов $f_1 = f_2$ и, соответственно, равенство нулю разностной частоты $\Delta f = 0$ на выходе смесителя СВЧ-сигналов.

В схемах автогенераторов использовались пленочные ЖИГ-резонаторы, которые изготавливались методом лазерного скрайбирования из эпитаксиальной пленки ЖИГ толщиной 20 мкм, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) с ориентацией поверхности (111). Размеры резонаторов составляли 2 мм $\times$ 2 мм. Внешний вид изготовленных резонаторов представлен на рис. 5.

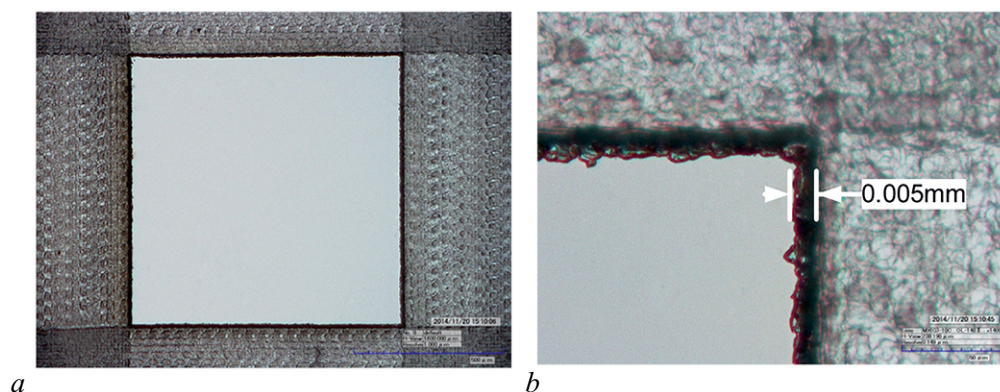


Рис. 5. а — Фотография пленочного ЖИГ-резонатора, изготовленного методом лазерного скрайбирования, b — фрагмент фотографии ЖИГ-резонатора

Fig. 5. a — Photograph of a film YIG resonator made by laser scribing, b — fragment of a photograph of a YIG resonator

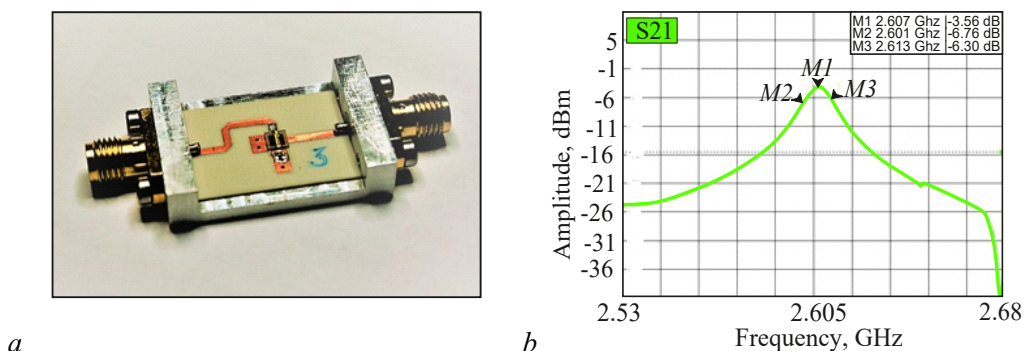


Рис. 6. *a* — Экспериментальный макет и *b* — S_{21} -параметры пленочного ЖИГ-резонатора
 Fig. 6. *a* — Experimental model and *b* — S_{21} parameters of the YIG film resonator

На рис. 6 представлены результаты испытания лабораторного макета ЖИГ-резонатора. На рис. 6, *a* представлен внешний вид лабораторного макета, на рис. 6, *b* представлены результаты измерения S_{21} -параметров макета резонатора.

Испытания проводились при фиксированном поле $H_0 = 2780$ Э. Данное измерение выполнялось для автономной характеристики ЖИГ-резонатора на векторном анализаторе цепей и не связано с работой генератора в составе портативной магнитной системы. Мощность входного сигнала фиксировалась на уровне 0 дБ. Измерения проводились при помощи векторного анализатора электрических цепей Rohde&Schwarz ZVA50. Вносимые потери ЖИГ-резонатора не превышали -4 дБ, нагруженная добротность резонатора составляла $Q \approx 300$.

В качестве активных элементов ЖИГ-генераторов использовались малошумящие усилители СВЧ марки РМА-15452. Усилители вместе с пленочными ЖИГ-резонаторами устанавливались на поверхность микрополосковой платы, как показано на схеме рис. 3, *b*. Плата изготавливалась из металлизированного с обеих сторон материала микрополосковых плат марки ТММ3 производства компании Rogers Corporation, который имел следующие характеристики: толщина диэлектрической подложки — 0.5 мм; толщина металлизации — 17 мкм; относительная диэлектрическая проницаемость подложки — 3.27; тангенс угла диэлектрических потерь — 0.0020; плотность — 1.78 г/см³.

Топология микрополосковой схемы генератора изготавливалась методом экспресс-технологии при помощи фрезерно-сверлильного станка ProtoMat S43 производства концерна LPKF Laser & Electronics AG. Испытание макета генератора проводилось в составе портативной системы намагничивания, как показано на рис. 7.

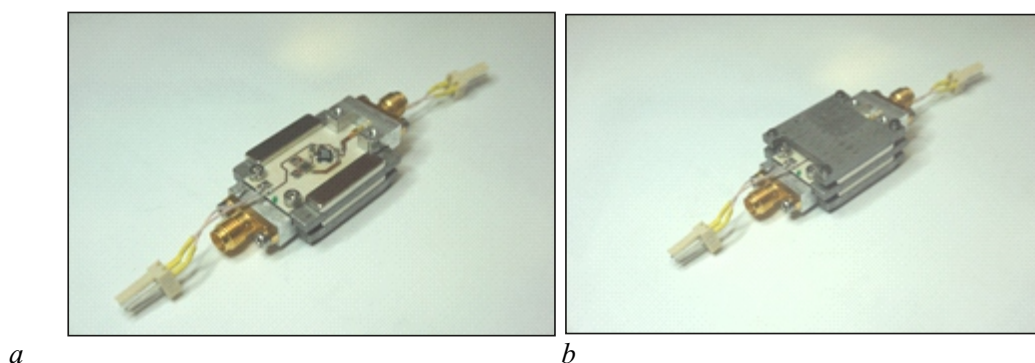


Рис. 7. Экспериментальный макет ЖИГ-генератора: *a* — в частично разобранном состоянии, *b* — в собранном состоянии
 Fig. 7. Experimental model of the YIG generator: *a* — partially disassembled, *b* — assembled

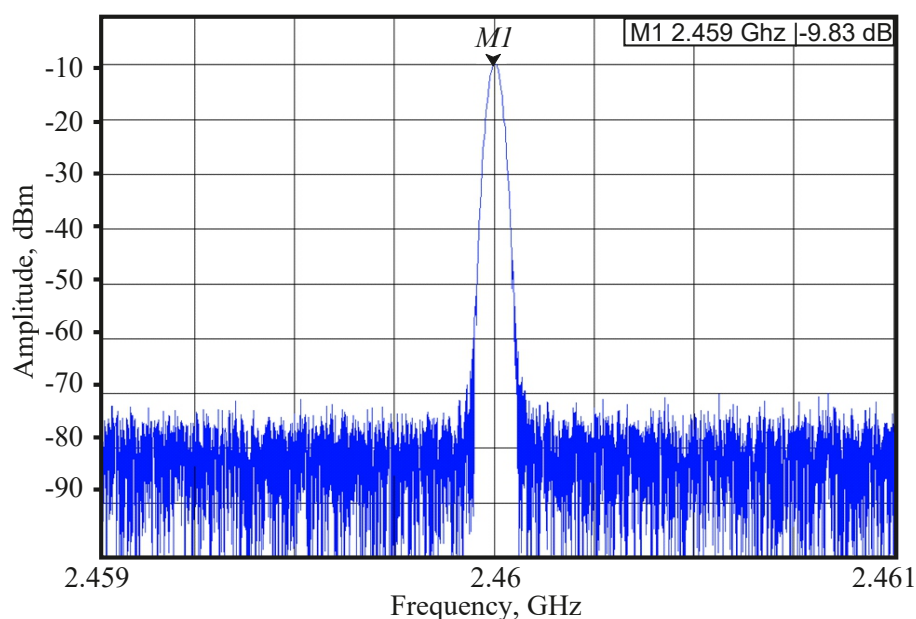


Рис. 8. Спектральная характеристика СВЧ-сигнала с выхода ЖИГ-генератора

Fig. 8. Spectral characteristics of the microwave signal from the output of the YIG generator

На рис. 8 представлен спектр выходного сигнала лабораторного макета ЖИГ-генератора. Измерения проводились при помощи анализатора спектра R&S FSW43 Signal and Spectrum Analyzer. Частота основной моды генерации была равна $f_0 = 2.458537$ ГГц, мощность генерируемого сигнала составляла $P_0 = -9.83$ дБм, шумовые составляющие проявлялись на уровне -60 дБм.

Как и ожидалось, ЖИГ-генератор генерировал СВЧ-сигнал в достаточно узкой полосе частот, но при этом наблюдались стохастические колебания частоты, вызванные радиопомехами в окружающем пространстве. Это затрудняло измерение фазовых шумов, но в то же время указывало на высокую чувствительность частоты ЖИГ-генератора к слабым магнитным полям.

На рис. 9 представлены результаты измерения ориентационной (угловой) чувствительности частоты сигнала ЖИГ-генератора при поворотах макета в магнитном поле Земли.

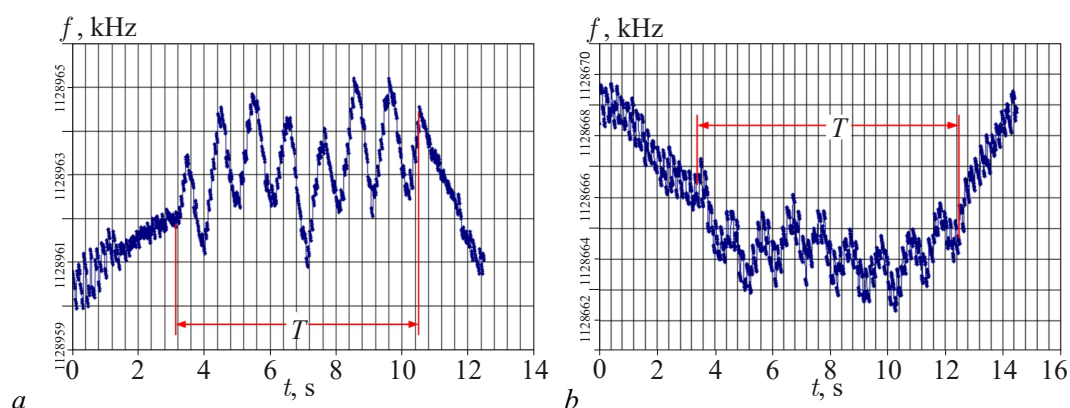


Рис. 9. Угловая зависимость частоты ЖИГ-генератора, измеренная при реверсном вращении макета генератора на углы $a = 0.036^\circ$ и $b = 0.012^\circ$

Fig. 9. Angular dependence of the YIG generator frequency measured during reverse rotation of the generator model at the angles $a = 0.036^\circ$ and $b = 0.012^\circ$

Макет был установлен на прецизионном поворотном стенде с шагом поворота 0.0001° . В процессе вращения стенда измерялась частота сигнала ЖИГ-генератора. Результаты измерений заносились в таблицу Excel. Для сбора данных использовалась плата P10-d 144 и соответствующее программное обеспечение. Строились графики зависимости частоты генерируемого сигнала от времени проведения сбора данных.

В режиме непрерывного вращения макета наблюдалась нестабильная, но относительно плавная зависимость частоты ЖИГ-генератора от угла поворота. При включении режима реверсного вращения возникали периодические колебания частоты, которые наблюдались на фоне стохастической нестабильности. Исходя из соотношения амплитуд периодических и стохастических колебаний, оценивался предел ориентационной чувствительности частоты ЖИГ-генератора. В нашем случае, как видно на рис. 9, *b*, порог угловой чувствительности частоты ЖИГ-генератора не превышал 0.012° . В то же время достигнутый порог чувствительности оказался значительно выше теоретически возможного $2 \cdot 10^{-6}^\circ$. Это могло быть вызвано собственным фазовым шумом ЖИГ-генератора, но в большей мере магнитными шумами в окружающем пространстве. Влияние шумовых помех можно было бы уменьшить, используя статистические методы выделения полезного сигнала из шума, но это не входило в задачу эксперимента.

Заключение

Предложены физические принципы построения термнезависимого векторного измерителя слабых геомагнитных полей на основе трёх однокоординатных сенсоров в виде бинарных модулей СВЧ-автогенераторов с плёночными ЖИГ-резонаторами. Показано, что антипараллельное намагничивание резонаторов обеспечивает удвоение отклика на нормальную составляющую поля при компенсации касательной составляющей и температурного дрейфа. Разработана конструкция портативной системы базового намагничивания, проведено её численное моделирование методом конечных элементов. В ходе предварительных макетных испытаний изготовлены плёночные ЖИГ-резонаторы и исследован лабораторный макет одиночного ЖИГ-генератора. Экспериментально подтверждена высокая ориентационная чувствительность генератора. Полученные результаты обосновывают перспективу создания бинарного дифференциального модуля и векторного измерителя в целом. Экспериментальная верификация работы бинарного модуля и трёхкоординатного макета является предметом дальнейших исследований. Предлагаемая концепция отличается простотой, надёжностью и технологичностью и может найти применение в системах геомагнитной навигации, мониторинга геомагнитной обстановки, а также в задачах исследования магнитных аномалий природного и техногенного происхождения.

Список литературы

1. *Lenz J., Edelstein S.* Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors Journal. 2006. Vol. 6, no. 3. P. 631–649. DOI: 10.1109/JSEN.2006.874493.
2. *Diaz-Michelena M.* Small magnetic sensors and their application // Sensors. 2009. Vol. 9. P. 2271. DOI: 10.3390/s90402271.
3. *Tumanski S.* Modern magnetic field sensors – a review // Przegląd Elektrotechniczny. 2013. Vol. R89. P. 1–12.
4. Hall Effect Sensing and Application. Freeport: Honeywell Inc., 1998. 127 p.
5. *Tadigadapa S., Mateti K.* Piezoelectric MEMS sensors: State-of-the-art and perspectives // Meas. Sci. Technol. 2009. Vol. 20. P. 092001. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/092001.
6. *Fetisov Y. K.* Piezoelectric resonance sensor of DC magnetic fields // IEEE Sensors Journal. 2014. Vol. 14, no. 6. P. 1817–1821. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2301711.
7. *Freitas P. P., Ferreira R., Cardoso S., Cardoso F.* Magnetoresistive sensors // J. Phys.: Condens. Matter. 2007. Vol. 19. P. 165221. DOI: 10.1088/0953-8984/19/16/165221.

8. *Mahdi A. E., Panina L., Mapps D.* Some new horizons in magnetic sensing: High-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials // *Sens. Actuators A*. 2003. Vol. 105, no. 3. P. 271–285. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00106-7.
9. *Wiksw J. P.* Applications of SQUID Magnetometers to Biomagnetism and Nondestructive Evaluation // In: Weinstock H. (ed) *Applications of Superconductivity*. vol. 365 of NATO ASI Series. Dordrecht: Springer, 2000. P. 139–228. DOI: 10.1007/978-94-017-0752-7_3.
10. *Серов В. Н., Фетисов Л. Ю., Фетисов Ю. К., Шестаков Е. И.* Высокочувствительный магнетометр на основе магнитоэлектрического датчика // *Российский технологический журнал*. 2016. Т. 4, № 5. С. 24–37. DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37.
11. *Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Dudko G., Filimonov Y., Balandin A. A., Khitun A.* A magnetometer based on a spin wave interferometer // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y.
12. *Гурзо В. В., Игнатиев А. А., Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Маринин А. В., Плешков В. В.* Векторный магнитометр малых магнитных полей // *Гетеромагнитная микроэлектроника*. 2004. № 1. С. 47–49.
13. *Castera J.-P., Hartemann P.* Magnetostatic wave magnetometer // Patent No. EP0093650 A1 France, IPC G01R 33/02, H03H 2/00: appl. 04.05.1982; publ. 09.11.1983. Assignee: THOMSON-CSF. 13 p.
14. *Тихонов В. В., Ануфриев А. Н.* Однокомпонентный сенсор геомагнитных полей // Патент № 2679461(13) С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/24: заявл. 07.03.2018; опубли. 11.02.2019. Заявитель: ООО «СПИНЛАБ». 12 с.

References

1. Lenz J, Edelstein S. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*. 2006;6(3): 631–649. DOI: 10.1109/JSEN.2006.874493.
2. Diaz-Michelena M. Small magnetic sensors and their application. *Sensors*. 2009;9:2271. DOI: 10.3390/s90402271.
3. Tumanski S. Modern magnetic field sensors – a review. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013;R89: 1–12.
4. Hall Effect Sensing and Application. Freeport: Honeywell Inc.; 1998. 127 p.
5. Tadigadapa S, Mateti K. Piezoelectric MEMS sensors: State-of-the-art and perspectives. *Meas. Sci. Technol.* 2009;20:092001. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/092001.
6. Fetisov YK. Piezoelectric resonance sensor of DC magnetic fields. *IEEE Sensors Journal*. 2014;14(6):1817–1821. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2301711.
7. Freitas PP, Ferreira R, Cardoso S, Cardoso F. Magnetoresistive sensors. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2007;19:165221. DOI: 10.1088/0953-8984/19/16/165221.
8. Mahdi AE, Panina L, Mapps D. Some new horizons in magnetic sensing: High-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials. *Sens. Actuators A*. 2003;105(3):271–285. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00106-7.
9. Wiksw JP. Applications of SQUID Magnetometers to Biomagnetism and Nondestructive Evaluation. In: Weinstock H, editor. *Applications of Superconductivity*. NATO ASI Series, vol. 365. Dordrecht: Springer; 2000. P. 139–228. DOI: 10.1007/978-94-017-0752-7_3.
10. Serov VN, Fetisov LYu, Fetisov YuK, Shestakov EI. A highly sensitive magnetometer based on a magnetoelectric sensor. *Russian Journal of Technology*. 2016;4(5):24–37 (in Russian). DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37.
11. Balynsky M, Gutierrez D, Chiang H, Kozhevnikov A, Dudko G, Filimonov Y, Balandin AA, Khitun A. A Magnetometer Based on a Spin Wave Interferometer. *Sci. Rep.* 2017;7:11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y.
12. Gurzo VV, Ignatiev AA, Lyashenko AV, Sotov LS, Marinin AV, Pleshkov VV. Vector magnetometer of small magnetic fields. *Heteromagnetic Microelectronics*. 2004;(1):47–49 (in Russian).

13. Castera J-P, Hartemann P. Magnetostatic wave magnetometer. Patent No. EP0093650 A1 France, IPC G01R 33/02, H03H 2/00: appl. 04.05.1982: publ. 09.11.1983. Assignee: THOMSON-CSF. 13 p.
14. Tikhonov VV, Anufriev AN. One-component sensor of geomagnetic fields. Patent No. 2679461(13) C1 Russia, IPC G01R 33/24: appl. 07.03.2018: publ. 11.02.2019. Assignee: ООО "SPINLAB". 12 p.



Тихонов Владимир Васильевич — родился в с. Альметьевка, Республика Татарстан (1951). Окончил с отличием Саратовский государственный университет по направлению «Физика» (1974). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков» (1986, ИРЭ РАН). В 1989 году присвоено ученое звание старшего научного сотрудника. Защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности «Физика магнитных явлений» (2011, ИРЭ РАН). Работает в Институте физики Саратовского государственного университета в должности профессора. Научные интересы: физика процессов возбуждения, распространения и гибридизации электромагнитных, спиновых и упругих волн в многослойных феррит-ферритовых и феррит-диэлектрических структурах. Опубликовано свыше 100 статей по указанным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: tvlad4@yandex.ru
 ORCID: 0000-0002-1422-7324
 AuthorID (eLibrary.Ru): 18697



Пташенко Андрей Сергеевич — родился в с. Кожевино Саратовской области (2000). Окончил с отличием Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского по направлению «Информационные системы и технологии» (магистратура, 2024). В настоящее время обучается в аспирантуре по специальности «Радиофизика». Работает в Институте физики СГУ в должности младшего научного сотрудника. Научные интересы: нелинейные и неоднородные эффекты в пленочных ЖИГ-структурах, невязимое распространение спиновых волн, магноники. Автор более 20 научных публикаций.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: andrey.po3@mail.ru
 ORCID: 0009-0006-5632-3249
 AuthorID (eLibrary.Ru): 1281457



Гришин Сергей Валерьевич — родился в 1974 году. Окончил физический факультет СГУ имени Н. Г. Чернышевского (1997). Кандидат физико-математических наук (СГУ, 2006). Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн Института физики СГУ. Область научных интересов — нелинейные явления в автоколебательных системах вакуумной и магнито-электронике, генераторы ультракоротких импульсов, метаматериалы на основе гиротропных сред. Автор более 50 научных статей, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах, четырех патентов на изобретение и двух патентов на полезную модель. Один из авторов коллективной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот».

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: sergrsh@yandex.ru
 ORCID: 0000-0002-3654-3299
 AuthorID (eLibrary.Ru): 42293