

Тихонов В.В., Ануфриев А.Н., Герасимов А.А.
*Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г.Чернышевского
ООО «СпинЛаб»
ООО «Спектран»*

Однокомпонентный сенсор геомагнитных полей

Однокомпонентный сенсор геомагнитных полей относится к устройствам измерения векторных характеристик слабых геомагнитных полей и может применяться в системах высокоточной геомагнитной навигации для мониторинга геомагнитной обстановки, для проведения научно-исследовательских, картографических и геолого-разведывательных работ.

Ключевые слова: железиттриевый гранат (ЖИГ), ЖИГ резонатор, ЖИГ генератор, магнитное поле Земли, геомагнитные измерения, сенсор геомагнитных полей, геомагнитная навигация

Окончание двадцатого века ознаменовалось созданием высокоэффективных систем спутниковой навигации и управления типа NAVSTAR (GPS), ГЛОНАС. Эти системы нашли широкое применение, но, не смотря на очевидные достоинства, эти системы имеют ряд существенных недостатков. Они зависимы от погодных условий, подвержены активному противодействию, но главное, они не применимы для объектов подводного базирования. Последнее обстоятельство стимулирует развитие альтернативных навигационных систем, среди которых особое место занимают геомагнитные системы.

Расширение сферы применения беспилотных аппаратов, в том числе аппаратов подводного базирования, многократно повышают требования к точности геомагнитной навигации. Это, в свою очередь, накладывает повышенные требования к точности бортовых систем позиционирования и к точности геомагнитных карт местности. Магнитные карты должны оперативно корректироваться с учетом природных и техногенных возмущений геомагнитных полей. Для этого необходима высокая точность и оперативность измерений геомагнитных полей, как на борту движущегося объекта, так и в реперных точках контролируемого пространства.

Известные методы магнитных измерений не в полной мере отвечают современным требованиям. Для сравнения, пределы чувствительности известных типов магнитных преобразователей представлены на рис.1, где штриховкой выделена область измерения геомагнитных полей.

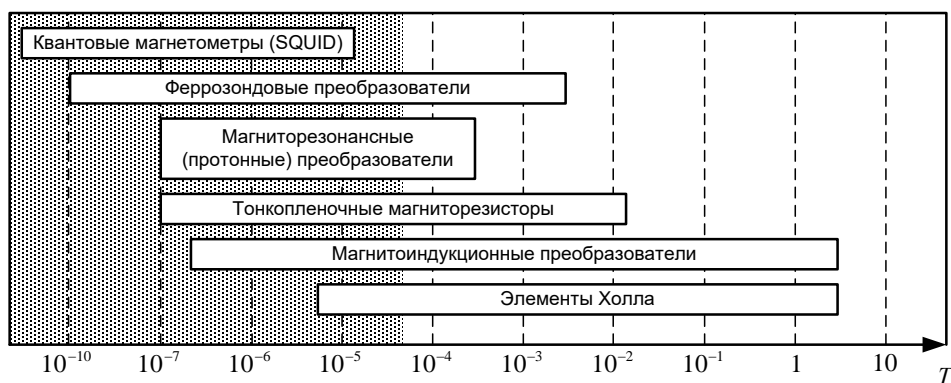


Рис.1. Пределы чувствительности различных типов магнитных преобразователей.

На рис.1 видно, что сверхчувствительные квантовые SQUID магнетометры не могут применяться в навигационных системах, так как их верхняя граница динамического диапазона существенно ниже напряженности геомагнитных полей. Наиболее чувствительные феррозондовые магнетометры также не в полной мере удовлетворяют требованиям бортовых систем. Их недостатки – большие размеры, ограниченный динамический диапазон, температурная зависимость, низкая механическая прочность, инерционность, сложность сопряжения с электроникой, а также трудоемкость изготовления и высокая стоимость. Все прочие типы магнитных преобразователей не обладают достаточно высокой чувствительностью к слабым геомагнитным полям.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость изыскания новых физических принципов геомагнитных измерений. В этом смысле наиболее перспективными представляются геомагнитные преобразователи на основе высокочастотных ЖИГ резонаторов. Частоты ЖИГ резонаторов обладают высокой чувствительностью к намагничивающим полям. Если к намагниченному резонатору дополнительно приложить магнитное поле Земли, то по сдвигу частоты ЖИГ резонатора можно адекватно оценить величину и направление приложенного поля. Для проведения магнитных измерений ЖИГ резонатор включался в цепь обратной связи автогенератора [1,2]. Измерялась частота генерируемого сигнала. Для измерения частоты использовался цифровой частотомер.

Главным недостатком предложенного метода является сильная зависимость частоты ЖИГ резонатора от температуры окружающей среды. Этот недостаток был частично устранен в конструкции преобразователя, состоящего из двух противоположно намагниченных ЖИГ резонаторов, включенных в цепи обратной связи автогенераторов [3]. Недостатками такой конструкции являлись значительные габариты и термодинамическая неустойчивость результатов измерений.

Целью данной работы является разработка малогабаритных, высокочувствительных и термонеиндемических однокоординатных сенсоров геомагнитных полей, предназначенных для использования в составе бортовых навигационных систем и систем мониторинга геомагнитной обстановки.

Блок-схема однокоординатного сенсора геомагнитных полей представлена на рис.2.

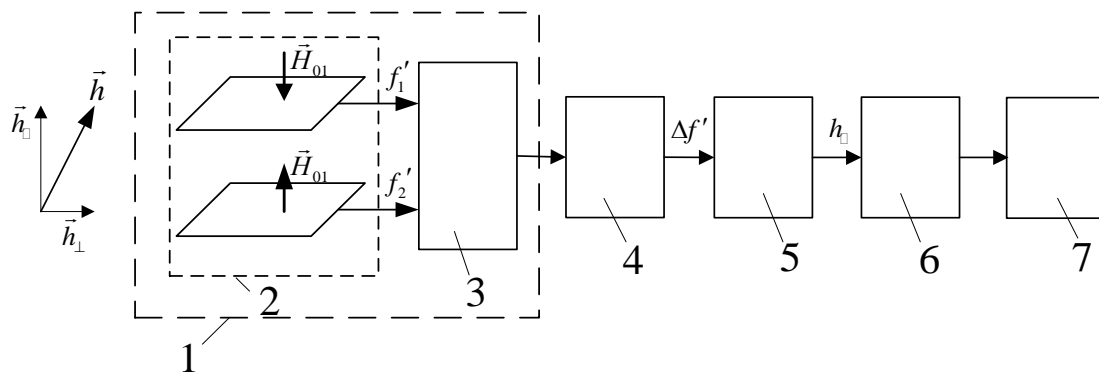


Рис.2. Блок-схема однокоординатного сенсора геомагнитных полей.

Однокоординатный сенсор геомагнитных полей 1 состоит из первичного модуля сенсора геомагнитных полей 2 и смесителя 3. Для обеспечения автоматизации обработки результатов измерений на выходе смесителя может быть подключен блок обработки выходных сигналов, включающий последовательно соединенные фильтр низких частот 4; цифровой частотомер 5; микропроцессор 6 с индикатором 7.

Конструкция первичного модуля сенсора геомагнитных полей 2 представлена на рис.3.

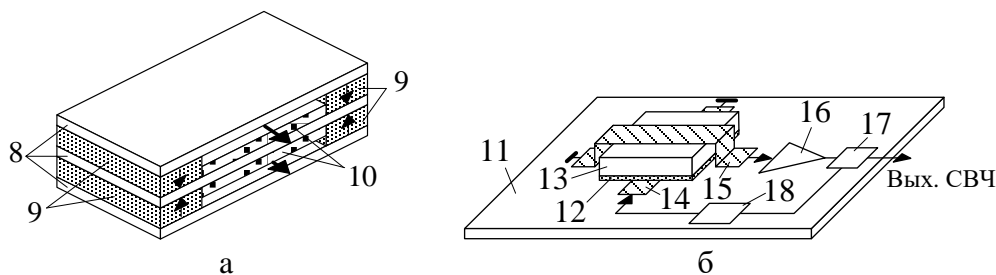


Рис.3. Конструкция первичного модуля сенсора геомагнитных полей.

Первичный модуль однокомпонентного сенсора геомагнитных полей 2 состоит из системы намагничивания (см. рис.3.а), включающей три параллельно расположенные стальные пластины 8, в зазорах между которыми установлены четыре идентичных постоянных магнита 9, по два в каждом зазоре, присоединенные одноименными полюсами к внутренней стальной пластине, и двух идентичных плат автогенераторов 10, установленных в зазорах стальных пластин и присоединенных металлизированными основаниями к противоположным поверхностям внутренней стальной пластины. Плата автогенератора 10 (см. рис.3.б) состоит из металлизированной диэлектрической подложки 11, на которой установлен пленочный ЖИГ резонатор, включающий пленку ЖИГ 12 выполненную в виде квадрата или диска на немагнитной подложке ГГГ 13, входного 14 и выходного 15 микрополосковых преобразователей СВЧ сигнала, расположенных на противоположных сторонах пленочного резонатора так, что оси микрополосковых преобразователей 14 и 15 совпадают с ортогональными осями резонатора. Между преобразователями включены малошумящий СВЧ усилитель 16, ответвитель СВЧ сигнала 17 и фазовращатель 18.

Устройство работает следующим образом. Две противоположно ориентированные пары постоянных магнитов, установленные в зазорах стальных пластин, создают встречные магнитные потоки, которые суммируются во внутренней стальной пластине, далее потоки разделяются и замыкаются через зазоры стальных пластин. При этом в зазорах наводятся противоположно направленные магнитные поля $\vec{H}_{01} \uparrow \downarrow \vec{H}_{02}$, ориентированные по нормали к поверхностям пленочных ЖИГ резонаторов.

При нормальном намагничивании пленки ЖИГ частоты первых резонансных мод пленочных ЖИГ резонаторов f_1 , f_2 практически совпадают с частотами нижней границы спектра возбуждения прямых объемных МСВ $f_1 \approx \gamma(H_{01} - 4\pi M_0)$, $f_2 \approx \gamma(H_{02} - 4\pi M_0)$, где $4\pi M_0 \approx 1760$ Гс - намагниченность насыщения пленки ЖИГ, $\gamma = 2.83$ МГц/Э - гиромагнитное отношение, H_{01} и H_{02} - напряженности магнитных полей в первом и втором зазоре стальных пластин. Постоянные магниты обеспечивают выполнение условия $H_{01}, H_{02} > 4\pi M_0$, что необходимо для полного насыщения пленочных ЖИГ резонаторов.

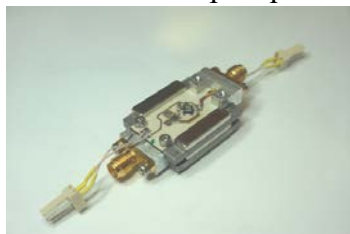
Частоты возбуждения ЖИГ резонаторов существенно зависят от внешних магнитных полей и от температуры окружающей среды. При наложении слабого геомагнитного поля $|\vec{h}| \ll |\vec{H}_{01}|, |\vec{H}_{02}|$, где $\vec{h} = \vec{h}_{\parallel} + \vec{h}_{\perp}$, $\vec{h}_{\parallel} \parallel \vec{H}_0$ и $\vec{h}_{\perp} \perp \vec{H}_0$, соответственно, нормальная и касательная составляющие геомагнитного поля, возникают сдвиги частот возбуждения пленочных резонаторов $f_1 \rightarrow f_1' = f_1^{\parallel} + f_1^{\perp}$, $f_2 \rightarrow f_2' = f_2^{\parallel} + f_2^{\perp}$ и, соответственно, частот возбуждения автогенераторов. При этом нормальная составляющая h_{\parallel} вызывает противоположные сдвиги частот $f_1^{\parallel} = \gamma[H_{01} + h_{\parallel} - 4\pi M_0]$ и $f_2^{\parallel} = \gamma[H_{02} - h_{\parallel} - 4\pi M_0]$, а касательная составляющая h_{\perp} вызывает только отклонения векторов \vec{H}_{01} , \vec{H}_{02} на пренебрежимо малые углы $\varphi_1 \approx h_{\perp}/H_{01} \ll 1$ и $\varphi_2 \approx h_{\perp}/H_{02} \ll 1$, что практически не вызывает дополнительных сдвигов частот $f_1^{\perp} = f_2^{\perp} = 0$. При этом разностная частота $\Delta f' = |f_1' - f_2'|$ связана с величиной нормальной составляющей геомагнитного поля h_{\parallel} простым соотношением $\Delta f' = 2\gamma h_{\parallel}$, а искомая компонента геомагнитного поля h_{\parallel} рассчитывается по формуле

$$h_{\parallel} = \frac{\Delta f'}{2\gamma} \quad (1)$$

Для измерения всех трех компонент вектора геомагнитного поля достаточно трех идентичных однокомпонентных сенсоров геомагнитных полей, ориентированных по осям заданного трехмерного базиса.

Существенно, что в предлагаемой конструкции устройства температурные сдвиги частот резонаторов практически не влияют на точность измерения геомагнитных полей, поскольку они имеют односторонний характер и полностью компенсируются при выделении разностной частоты. Установка плат автогенераторов на противоположных сторонах внутренней стальной пластины существенно снижает разницу температур пленочных ЖИГ резонаторов и постоянных магнитов при резких изменениях температуры окружающей среды, что повышает термодинамическую устойчивость.

На рис.4. представлен лабораторный макет первичного модуля геомагнитного сенсора



а

б

Рис.4. Лабораторный макет первичного модуля геомагнитного сенсора.
а – макет в частично разобранном состоянии, б – макет в собранном состоянии.

Ниже приведены типичные характеристики однокомпонентных сенсоров геомагнитных полей:

- Магнитная чувствительность, нТ – не более 10
- Угловая чувствительность, град – не более 0,01
- Динамический диапазон, нТ - не менее $10 \cdot 10^6$
- Частота измерений, Гц – не менее 100

Ожидается, что применение геомагнитных сенсоров на основе бинарных модулей тонкопленочных ЖИГ резонаторов позволит значительно повысить точность и надежность бортовых навигационных систем, позволит повысить точность и оперативность систем мониторинга геомагнитной обстановки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы Старт-1 по договору о предоставлении гранта №2801 ГС1/35292.

Библиографический список

1. Гурзо В.В. и др. Векторный магнитометр малых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2004. Вып.1. С.50-52.
2. Ветошко П.М. и др. Магнитомодуляционный сенсор магнитного поля на базе пленок феррита-граната для магнитокардиографических исследований // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 16. С.64-71.
3. Европейский патент №0093650, МПК G01R 33/02, опубл. 09.11.1983