



УДК 621.318, 537.633.9, 53.082.78

© А. Л. Хвалин, 2015

ТРЁХКОМПОНЕНТНЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СФЕРИЧЕСКОМ ЖИГ РЕЗОНАТОРЕ

Хвалин А. Л. – д-р техн. наук, доцент, e-mail Khvalin63@mail.ru (Саратовский государственный университет)

В статье представлена конструкция трёхкомпонентного датчика магнитного поля, использующего магнитные свойства железо-иттриевого граната, для одновременного определения величины и направления вектора индукции магнитного поля Земли, либо магнитного поля, создаваемого ферромагнитным объектом. Подобные устройства могут использоваться в магнитной геологоразведке, при диагностике и обнаружении ферросодержащих тел, навигации по магнитному полю Земли.

Ключевые слова: датчик магнитного поля, железо-иттриевый гранат, полосовая доменная структура, преобразователь индукции магнитного поля, магнитоуправляемый генератор, ось легкого намагничивания.

Введение

Магнитометры слабых магнитных полей, в т.ч. магнитного поля Земли, используются с 30-х годов прошлого века. Существует большое число типов магнитометров, имеющих различные чувствительности к магнитному полю и масс-габаритные размеры. Как правило, магнитометры с высокой чувствительностью к магнитному полю (менее 1 нТл), имеют худшие масс-габаритные и эксплуатационные характеристики, ограничивающие области их применения. В настоящее время наилучшие масс-габаритные характеристики имеют магнитометры на основе магниторезистивного и гальваномагнитного эффектов, при этом их чувствительность к магнитному полю может достигать десятых долей мкТл. Дальнейшее повышение чувствительности магнитометров при сохранении компактности возможно с использованием в качестве магниточувствительных элементов резонаторов из железо-иттриевого граната (ЖИГ) [1].

Описание конструкции магнитометра

В [2] представлены результаты информационного поиска по современным векторным магнитометрам. Известны векторные магнитометры на основе феррозондовых и индукционных датчиков, имеющие чувствительность к

магнитному полю порядка 10^{-11} - 10^{-10} Тл [2]. При использовании трех одинаковых датчиков, направление вектора измеряемого магнитного поля определяется путем поворота оси магнитометра и достижения равенства сигналов от всех датчиков. Такие магнитометры имеют значительную сложность механической и измерительной систем и требуют использования идентичных датчиков, что трудно осуществить на практике.

Конструкции векторных магнитометров на основе одного датчика магнитного поля требуют выполнения магнитного пеленга, т.е. проведения ряда измерений с одновременными перемещениями магнитометра.

Подобные магнитометры сложны при практической реализации и не позволяют достоверно определять направление вектора магнитного поля при наличии локальных возмущений, магнитных помех, а также неприменимы для определения местонахождения протяжённых объектов, нескольких объектов, при поиске движущихся объектов и т.д.

Представленный в настоящей статье магнитометрический датчик (магнитометр) для определения величины и направления полного вектора индукции магнитного поля Земли, либо магнитного поля, создаваемого ферромагнитным объектом, лишен указанных выше недостатков и может быть выполнен на основе базового усилителя [3] или генератора [4], выходная частота которого управляется внешним постоянным магнитным полем. В датчике использованы монокристаллические арсенид-галлиевые технологии на основе полевых транзисторов с затвором Шоттки ПТШ-300. На рис. 1 показан внешний вид кристалла арсенид-галлия размером 1 X 1,5 мм, на котором выполнен магнитоуправляемый генератор (ГУМ) с диапазоном рабочих частот 0,9- 1,2 ГГц [5].

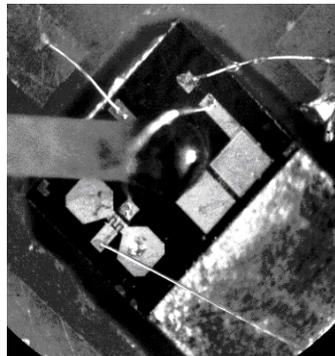


Рис. 1. Внешний вид монокристаллической конструкции с установленным СР (без магнитной системы)

Магниточувствительный элемент (см. рис. 1, 2), сферический ЖИГ резонатор (СР), установлен в линии обратной связи генератора. Для эффективного взаимодействия СР с линией передачи и стабильности параметров ГУМ возникает необходимость создания специальной микрополосковой конструк-



ции, так называемого преобразователя индукции магнитного поля [1, 6], что позволяет получить чувствительность к магнитному полю порядка 1,5 нТл [7].

В ряде работ проведены теоретические [8- 10] и практические [11- 12] исследования по формированию доменных структур в образцах ЖИГ и управлению их свойствами, что позволяет их использовать при создании векторного магнитометра. Представленная конструкция магнитометра использует магнитные свойства кристаллов ЖИГ, заключающиеся в существовании в них трёх выделенных направлений- осей лёгкого намагничивания (ОЛН) [13]. Возможность использования одного магниточувствительного элемента, сферического ЖИГ резонатора (СР), для получения полного вектора магнитного поля поясняется на рис. 2.

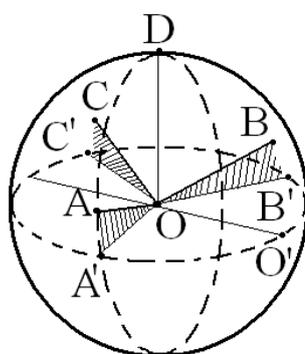


Рис. 2. Сферический ЖИГ резонатор

При поочерёдном включении магнитного поля в направлении ОЛН, направление вектора намагничённости резонатора устанавливается вдоль соответствующей ОЛН (ОА, ОВ или ОС на рис. 2), что приводит к изменению частоты ГУМ вследствие различий во взаимной ориентации вектора намагничённости резонатора и вектора внешнего магнитного поля.

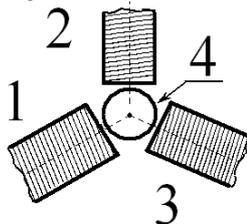


Рис. 3. Магнитная система векторного магнитометра. Цифрами на рисунке обозначены: 1, 2, 3 – катушки индуктивности; 4- сферический ЖИГ резонатор

Компактная магнитная система (рис. 3) расположена вблизи СР и состоит из трех катушек индуктивности, что позволяет периодически изменять ориентацию вектора намагничённости в резонаторе на 120° (в проекции на горизонтальную плоскость). На рис. 3 в проекции на горизонтальную плоскость (A'B'C' на рис. 2) показано расположение катушек индуктивности (1, 2, 3) для формирования в резонаторе (4) вектора намагничённости, ориентированного

вдоль одной из трёх ОЛН (ОА, ОВ, ОС на рис. 2). Вопросы ориентации СР относительно катушек индуктивности являются предметом отдельного исследования и частично рассмотрены в [13]. Компоненты V_1 , V_2 , V_3 вектора магнитной индукции и полный вектор магнитной индукции V_0 внешнего постоянного магнитного поля показаны на рис. 4.

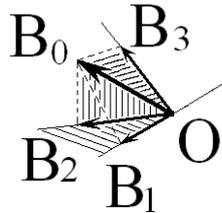


Рис. 4. Вектор магнитной индукции V_0 и его компоненты V_1 , V_2 и V_3

Блок-схема магнитометра представлена на рис. 5. Генератор, управляемый магнитным полем, подключен к ЭВМ через плату сопряжения, необходимую для передачи результатов измерений частоты от частотомера. ЭВМ предназначена для обработки результатов измерений и вычисления соответствующей компоненты магнитного поля.

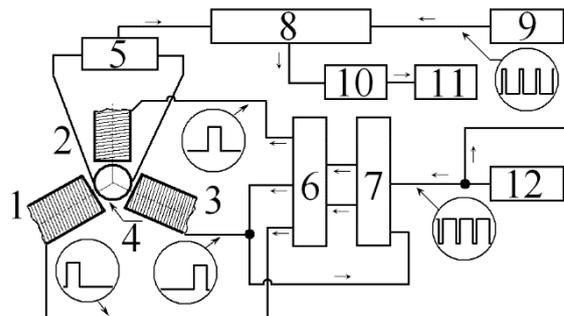


Рис. 5. Блок-схема магнитометра. Цифрами на рисунке обозначены: 1, 2, 3 – катушки индуктивности; 4- сферический ЖИГ резонатор; 5- СВЧ генератор, управляемый магнитным полем; 6- демультиплексор; 7- счётчик импульсов; 8- частотомер; 9- инвертор; 10- плата сопряжения; 11- ЭВМ; 12- генератор импульсов

В цепи обратной связи ГУМ (5), находится СР (4). Вблизи СР находятся катушки индуктивности (1, 2 и 3 на рис. 3 и 5), на которые поочерёдно поступают импульсы тока от генератора прямоугольных импульсов. Соответствующие соединители типа «коаксиал – коаксиал» и «микростриповая линия- коаксиал» на рисунках не показаны и рассчитываются по модели, представленной в [14].

Поочерёдное включение трех катушек индуктивности (см. рис. 3 и 5) производится с использованием логического блока управления магнитной системой на основе несложных базовых логических схем. Последовательность прямоугольных импульсов с генератора импульсов (12) подается на



двоичный двухразрядный суммирующий счетчик (7). На выходе счётчика (7) последовательно формируются управляющие адресные двоичные коды (10, 01, 11), соответствующие трём катушкам индуктивности. После каждого третьего импульса на счётчик подается сигнал (с катушки индуктивности 3), возвращающий его в исходное состояние.

Адресные выходы счётчика подаются на демультиплексор (6) с двумя входами, в котором сигналы с входов распределяются в желаемой последовательности по трём выходам. Выбор нужной выходной шины обеспечивается соответствующим кодом на адресных входах (10, 01 либо 11).

При этом в катушках индуктивности поочередно включаются импульсы тока, создающие магнитное поле определенного направления и поочередно задающие направление вектора намагниченности резонатора по трём ОЛН (ОА, ОВ, ОС на рис. 2).

К выходу ГУМ (5) подсоединён вход частотомера (8), который выполняет измерения частоты ГУМ при поступлении импульсов запуска частотомера с выхода инвертора (9). При экспериментальных исследованиях использовался частотомер типа ЧЗ-85/3R с абсолютной погрешностью измерения $\pm 5 \cdot 10^{-10} \cdot A$, где A - измеренное значение частоты. С выхода частотомера (8) измеренные значения частоты через плату сопряжения (10), выполняющую функции интерфейса, поступают для обработки в ЭВМ (11). С помощью программного обеспечения в ЭВМ производятся необходимые вычисления и определяются величина и направление полного вектора магнитной индукции (см. рис. 4) внешнего постоянного магнитного поля ($V_0 = V_1 + V_2 + V_3$).

Принцип действия магнитометра

Магнитометр работает следующим образом (см. рис. 5). Генератор прямоугольных импульсов (12) с частотой ν посылает импульсы тока на катушки индуктивности (1), (2) и (3). Логический блок управления магнитной системой (блоки 6 и 7) выполняет поочередное включение импульсов тока в трех катушках индуктивности. При длительности импульсов порядка 1 мС и индуктивности 1 мГн переходные процессы незначительны и не требуют дополнительной корректировки. При диаметре СР порядка 0,5 мм, диаметре и длине катушек индуктивности (1, 2 и 3) 0,75 мм и 1,5 мм соответственно, в области СР (4) создается достаточно однородное магнитное поле величиной около 200 Гс. Таким образом, катушки индуктивности (1, 2 и 3) поочередно создают в области СР магнитные поля, направленные вдоль трёх ОЛН. При этом вектор намагниченности СР изменяет направления (в проекции на горизонтальную плоскость $A'B'C'$ на рис. 2 соответствующие углы равны 120°).

Результирующее магнитное поле в области СР будет определяться суммой векторов магнитной индукции внешнего (измеряемого) поля V_0 и поля V_i от одной из катушек индуктивности (1, 2 или 3 на рис. 3):

$$V = V_0 + V_i,$$

где $i=1,2,3$.

Информация о величине магнитной индукции содержится в частоте ГУМ (5), которая задаётся частотой ферромагнитного резонанса в СР и измеряется с помощью частотомера (8). Величина магнитной индукции связана с измеренной частотой простым соотношением:

$$f = \gamma |B|, \text{ где } \gamma - \text{ известная величина гиромагнитного отношения.}$$

Импульсы запуска частотомера с инвертора (9) синхронизированы с частотой переключения направления магнитного поля v . Затем сигнал с выхода частотомера 8 через необходимую плату сопряжения (10) поступает для обработки в ЭВМ (11).

Полный вектор магнитной индукции B_0 находится путём векторного суммирования найденных компонент B_1 , B_2 и B_3 (см. рис. 3).

Представленная конструкция магнитометра имеет ряд преимуществ по сравнению с известными решениями. При определении положения объекта обычно применяется способ «пеленга», при котором несколько идентичных датчиков определяют азимутальные углы в направлении объекта, либо используется один датчик, который необходимо перемещать и повторно выполнять определение направления на ферросодержащий объект [2]. Традиционные подходы при решении задач обнаружения местоположения объектов, следовательно, должны использовать либо идентичные датчики, либо один, который необходимо перемещать.

Таблица 1

Оценка чувствительности датчика магнитного поля.

Наименование параметра	Достигнутые значения
Чувствительность по магнитной индукции Земли в 3-х перпендикулярных плоскостях, МГц/мТл	21,8±2,2
	21,8±2,2
	21,0±2,1
Чувствительность по угловым координатам в 3-х перпендикулярных плоскостях, кГц/град	3,52±0,07
	10,55±0,21
	10,71±0,22

Представленное решение объединяет оба подхода. Использование магнитных свойств СР, позволяющих изменять угол вектора намагниченности СР, создаёт возможности для пространственного пеленга. Использование одного и того же ГУМ решает проблему идентичности датчиков.

Теоретическое значение крутизны перестройки частоты ГУМ от индукции магнитного поля определяется гиромагнитным отношением и составляет 28 Гц/нТл. Достигнутые на практике значения по чувствительности к магнитному полю [1, 7, 13] показаны в табл. 1.

Типичная зависимость выходной частоты магнитометра от величины управляющего постоянного внешнего магнитного поля показана на рис. 6.

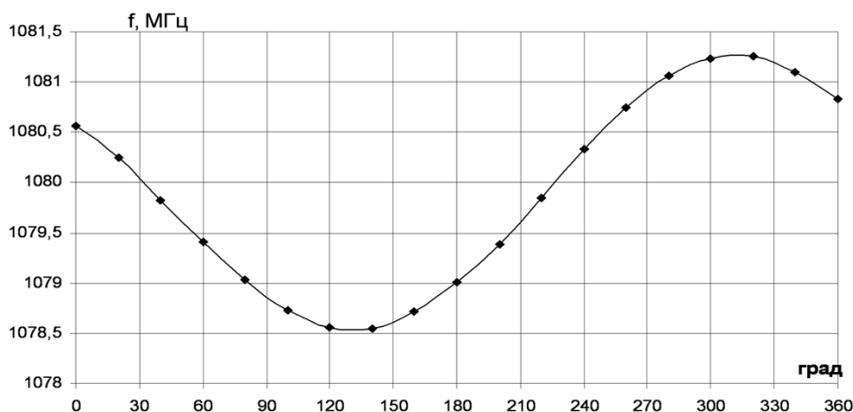


Рис. 6. Зависимость частоты генерации магнитометра от угла поворота в горизонтальной плоскости в магнитном поле Земли

Представленная конструкция векторного магнитометра, по сравнению с известными прототипами, имеет повышенную чувствительность к магнитному полю при достаточно простом способе определения направления вектора индукции магнитного поля, либо направления на ферросодержащий объект. Магнитометр может использоваться для решения задач навигации по магнитному полю Земли, обнаружения и диагностики ферросодержащих тел, датчиков магнитных полей [13] и пр. В зависимости от требуемых технических параметров магнитометра, блоки №№ 5-12 на рис. 5 могут быть выполнены в виде «системы на кристалле».

Библиографические ссылки

1. Хвалин А.Л., Овчинников С.В., Сотов Л.С., Самолданов В.Н. Первичный преобразователь на основе ЖИГ-генератора для измерения сильных магнитных полей // Датчики и системы. - 2009. - № 10. - С. 57-58.
2. Кудрявцева С.П., Романченко Л.А., Страхова Л.Л., Сотов Л.С., Маслов А.А. Анализ патентной информации характеристик магнитометрических датчиков из магниторезистивных и полупроводниковых материалов, датчиков генераторного типа, микрорезонаторных датчиков и магнитометров на их основе // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2005. - № 2. - С. 177-193.
3. Хвалин А.Л., Игнатъев А.А., Ляшенко А.В., Васильев А.В., Самолданов В.Н. Электродинамическое моделирование СВЧ- усилителей с гетеромагнитным управлением // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2004. - № 1. - С. 99-105.
4. Хвалин А.Л., Сотов Л.С., Васильев А.В. Расчёт характеристик интегрального магнитоуправляемого генератора в диапазоне частот 26,0 ... 37,5 ГГц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2010. - № 11. - С. 47-49.
5. Хвалин А.Л., Сотов Л.С., Овчинников С.В., Кобякин В.П. Экспериментальные исследования гибридного интегрального магнитоуправляемого генератора // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2009. - № 11. - С. 42-44.
6. Самолданов В.Н., Игнатъев А.А., Ляшенко А.В., Солопов А.А., Хвалин А.Л., Маринин А.В., Коваленко М.Л. Компьютерное моделирование ферритовых резонато-



ров во внутренних цепях биполярного транзистора в усилительном режиме работы // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2004. - № 1. - С. 110-118.

7. Овчинников С.В., Сотов Л.С. Методика оценки чувствительности первичного преобразователя для датчика вибраций на основе СВЧ-феррорезонансного автогенератора // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2011. - № 10. - С. 51-61.

8. Хвалин А.Л. Магнитостатические модели 180-градусных доменных границ в одноосных пленках железо-иттриевого граната // Антенны. - 2011. - № 11. - С. 51-56.

9. Хвалин А.Л. Метод поверхностной магнитной проницаемости в решении задачи анализа слоистых ферритосодержащих структур // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2009. - № 4. - С. 25-30.

10. Хвалин А.Л. Дисперсионные соотношения для слоистых ферритосодержащих структур в прямоугольном волноводе // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2010. - № 1. - С. 73-80.

11. Хвалин А.Л. Моделирование магнитной микроструктуры полосовых доменов в пленках ЖИГ // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2011. - № 11. - С. 4-14.

12. Хвалин А.Л., Солопов А.А., Ляшенко А.В. Исследование СВЧ резонаторов на эпитаксиальных структурах ЖИГ с учётом доменной структуры // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2012. - № 12. - С.4-11.

13. Хвалин А.Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.04 // Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики. - Самара, 2014. - 32 с.

14. Kats V.M., Meschanov V.P., Khvalin A.L. Synthesis of superwide-band matching adapters in round coaxial lines. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. -2001. - Т. 49. - № 3. - С. 575-579.

Title: The Three-Component Sensor of a Magnetic Field on a Spherical YIG Resonator

Authors' affiliation:

Khvalin A. L. - Saratov State University, Saratov, Russian Federation

Abstract: The design of the three-component sensor of the magnetic field using magnetic properties of the iron-yttrium garnet, for simultaneous determination of the size and the direction of the magnetic inductance vector of the Earth's field, or the magnetic field created by a ferromagnetic object is presented in the paper.

Key words: the sensor of a magnetic field, iron-yttrium garnet, domain structure, the converter of the magnetic field induction, the magnetic- field ruled generator, axis of easy magnetization.