

Особенности построения схемы регистрации оптических изображений в автономном квантовом датчике магнитного поля

С.Э. Логунов¹, В.В. Давыдов^{1,2}, М.Г. Высоцкий¹, В.И. Дудкин³, Д.А. Пузько¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, ул. Институт, владение 5, р.п. Большие Вяземы, Московская область, Россия, 143050

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Большевиков 22/1, Санкт-Петербург, Россия, 193232

Аннотация. В статье рассмотрена конструкции автономного квантового датчика для регистрации вариации магнитного поля. Установлены особенности регуляции дифракционной картинке лазерного излучения с использованием феррофлюидной ячейки, размещенной в однородном постоянном магнитном поле. Определены оптимальные параметры для конструкции феррофлюидной ячейки, магнитной жидкости и лазерного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований вариации магнитного поля от подвижных морских объектов.

1. Введение

В настоящее время одной из актуальных задач является контроль различных районов морских акваторий. Наибольший интерес при решении данных задач представляет определение наличия в этих районах подвижных морских объектов, как надводных, так и подводных [1-4]. Для обнаружения подвижных морских объектов применяются различные методы и разработанные на их основе приборы.

Наиболее эффективными из них являются: акустика, радиолокация, космическая съемка в хорошую погоду, магнитные измерения и волоконно-оптические антенны [4-10]. Необходимо отметить, что устройства, разработанные на основе этих физических явлений, обладают как достоинствами, так и недостатками. Все эти приборы и устройства очень хорошо зарекомендовали себя при их использовании на кораблях и летательных аппаратах, где нет ограничений на потребление электрической энергии [4-11]. Ограничения, связанные с электропитанием при использовании данных устройств в автономном режиме, например, на морском буе (автономный датчик) становятся определяющими. Возникает много проблем с их долговременной работой в автономном режиме, так как размер и вес буя ограничен. Это не позволяет разместить в нем аккумулятор больших размеров. При больших размерах буй хорошо заметен. Использовать такие устройства для скрытного контроля состояния района крайне сложно.

Необходимо также отметить, что данные автономные устройства не должны реагировать на различные электромагнитные помехи, которые специально создаются для определения

положения подобных датчиков с целью выведения их из строя или изъятия из водной акватории [3, 12].

Наиболее оптимальным решением в этом случае является использование магнитометров [6, 7, 10, 13]. Подвижный магнитный объект изменяет при движении структуру силовых линий магнитного поля. Создается вариация магнитного поля. По значению этой вариации можно определить как наличие магнитного объекта и направление его движения. Расшифровка карты изменения вариации магнитного поля позволяет определить конфигурацию магнитного объекта (сделать его предварительную идентификацию). Это особенно важно при контроле движения по заданному району морской акватории подводных объектов. Современные магнитометры, которые могут регистрировать вариацию магнитного поля, например, квантовые или феррозондовые, обладают средними массогабаритными размерами. Но для устойчивой их работы требуется высокая стабилизация температуры в морском буе, что потребует большого расхода электроэнергии. Кроме того, они стоят очень дорого, особенно квантовые, которые менее чувствительны к колебаниям внешней температуры. Создание системы на основе квантовых магнитометров возможно только при контроле крайне важных районов или для решения исключительных задач.

Поэтому разработка малогабаритных, недорогих и надежных датчиков для решения рассмотренных задач крайне актуальна. Одним из возможных направлений её решения могут быть рассмотренные в нашей статье квантовые датчики на основе феррофлюидной ячейки. Разработанные нами ранее квантовые устройства с использованием феррофлюидных ячеек хорошо себя зарекомендовали при контроле однородности магнитных систем и визуализации магнитных полей [13-18]. При построении на их основе квантовых датчиков возникает ряд особенностей при регистрации оптических изображений рассеянного лазерного излучения. Подробное рассмотрение их крайне необходимо для создания надежной конструкции квантового датчика для определения положения подвижного магнитного объекта.

2. Конструкция квантового датчика и особенности регистрации оптических изображений

Проведенные нами ранее исследования позволили установить, что в случае размещения феррофлюидной ячейки с ферромагнитной жидкостью в постоянном магнитном поле, наночастицы, например, гематита выстраиваются по его силовым линиям [15, 18]. Это связано с тем, что энергия магнитного поля, действующая на частицу больше энергии её теплового движения. Так как тепловое движение достаточно равномерно распределяет наночастицы по ферромагнитной жидкости. Поэтому при помещении феррофлюидной ячейки в магнитное поле они сместятся на его ближайшие силовые линии и будут также равномерно распределены, как и в отсутствие магнитного поля.

При таком размещении наночастиц в феррофлюидной ячейке в пространстве между полюсами магнитной системы образуются полосы с различной степенью прозрачностью для лазерного излучения. Эти полосы в случае высокой однородности магнитного поля являются подобием дифракционной решетки с периодом, соответствующим расстоянию между силовыми магнитными линиями [15, 18].

Проведенные исследования показали, что в качестве магнитной жидкости наиболее целесообразно применять водный раствор однодоменных наночастиц гематита с объемной концентрацией 0.054 с поверхностно активным веществом (ПАВ) гидроксид тетраметиламония. Нами также было установлено, что наиболее эффективно для регистрации дифракционных изображений нужно использовать лазерное излучения с $\lambda = 613$ нм с высокой степенью когерентности.

Все это позволило нам разработать конструкцию автономного квантового датчика для размещения его на различных объектах, например, морском бую. На рис. 1 представлена структурная схема разработанного нами датчика с устройствами обработки и управления, и передачи сигнала на антенну, размещенную на буи или в блок команд, осуществляющий приведение в действие различных механизмов.

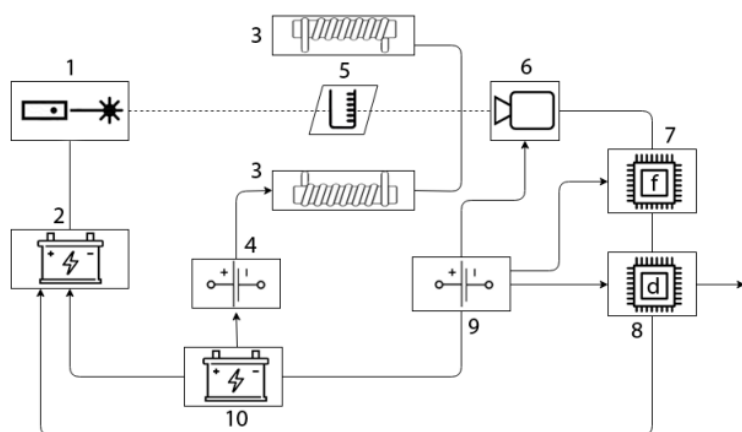


Рисунок 1. Структурная схема лабораторного макета квантового датчика: 1 - полупроводниковый лазер; 2 - электропитание лазера; 3 - катушка индуктивности; 4 - стабилизированный источник тока; 5 - феррофлюидная ячейка; 6 - специализированная камера; 7 - схема обработки; 8 - схема передачи данных; 9 - источник питания; 10 - аккумулятор.

Для создания постоянного магнитного поля используется специализированный соленоид 3. Изменяя напряжение на источнике питания 10 можно управлять индукцией поля B_0 от нуля до 2.4 мТл. Это позволяет при включении соленоида зафиксировать наночастицы на силовых линиях магнитного поля и образовать подобие дифракционной решетки. Далее индукция магнитного поля уменьшается до $B_0 = 0.206$ мТл. При таком значении индукции неоднородность поля составляет 10^{-5} см^{-1} . Дифракционная картина от прошедшего через неё лазерного излучения, регистрируемая специализированной камерой относительно центрального максимума, носит симметричный характер.

Появление рядом с соленоидом магнитного объекта, который при движении создает свое магнитное поле с определенными вариациями по различным направлениям. Приведет к тому, что магнитное поле от подвижного объекта нарушит однородность слабого магнитного поля соленоида. Дифракционная картина в этом случае станет не симметричной. Зафиксировав разницу между двумя регистрируемыми изображениями можно установить появление подвижного магнитного объекта на определенном расстоянии от нашего квантового датчика. Корпус буя делается из немагнитного прочного материала, которых сейчас выпускается достаточно много [19, 20].

Проведенные нами исследования позволили установить следующую особенность регистрации изображений дифракционной картины от размещенной в магнитном поле феррофлюидной ячейки. В магнитной жидкости в случае размещения феррофлюидной ячейки в вертикальном состоянии под действием силы тяжести со временем большая часть наночастиц размещается внизу ячейки. Поэтому слой магнитной жидкости в направлении распространения лазерного излучения, которое должно размещаться на линии, проходящей через центр Земли, не должен превышать 2-3 мм. Непрозрачные торцы феррофлюидной ячейки должны быть расположены перпендикулярно силовым линиям магнитного поля соленоида. Для определения направления движения магнитного объекта вариацию магнитного поля, которая создается при его движении, необходимо регистрировать в трех направлениях (X, Y и Z). Расположить феррофлюидную ячейку в соленоиде для того, чтобы регистрировать дифракционное изображение от прошедшего через неё лазерного излучения в трех направлениях невозможно. Можно только в двух. Поэтому для надежной работы квантового датчика надо в случае размещения соленоида для создания магнитного поля в направлении по радиусу Земли (ось OZ) изображение дифракционной картины регистрируется в отраженном излучении. В ряде случаев вариация магнитного поля от подвижного магнитного объекта оказывает существенное воздействие на структуру силовых линий только в направлении OZ.

Поэтому нами были рассмотрены два варианта образования дифракционных максимумов для регистрируемого изображения от прошедшего и отраженного лазерного излучения.

На рис. 2 схема распространения лазерного излучения через феррофлюидную ячейку в магнитном поле B_0 .

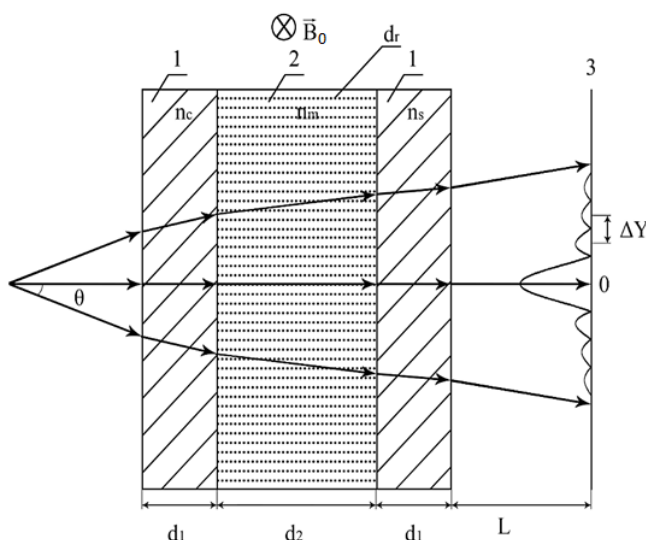


Рисунок 2. Схема распространения лучей лазерного излучения в феррофлюидной ячейке при регистрации дифракционной картины в проходящем свете: 1 - стенки феррофлюидной ячейки; 2 - слой магнитной жидкости в направлении, перпендикулярном магнитному полю, с толщиной, равной d_r ; 3 - экран.

На границах сред воздух-стекло, стекло-магнитная жидкость, магнитная жидкость-стекло и стекло-воздух учтено преломление лазерного излучения. Установлено, что интенсивность дважды отраженного лазерного излучения от границ разделов сред (стекло-магнитная жидкость и стекло-воздух) на формирование дифракционного изображения в прошедшем излучении оказывает не существенное влияние. Поэтому при определении положения дифракционных максимумов эту часть излучения не стоит учитывать. В квантовом датчике специализированная камера размещается на месте экран 3 (рис. 2) на расстоянии L от боковой грани феррофлюидной ячейки. В плоскости параллельной силовым линиям магнитного поля регистрируется дифракционное изображение. Положение каждого максимума на экране относительно его центра (точка 0) будет определяться порядком дифракции k и зависит от периода образовавшейся дифракционной решетки d_r .

Для данного случая нами была выведена формула для расчета положения дифракционных максимумов на экране:

$$\frac{d_r^2 - \lambda^2 k_2^2}{\lambda^2 k_2^2} \Delta Y^2 + 2L \frac{k_1^2}{d_r^2 - k_1^2 \lambda^2} \frac{d_r^2 - k_2^2 \lambda^2}{k_2^2} \Delta Y + 4L^2 \frac{k_1^4 \lambda^2}{(d_r^2 - k_1^2 \lambda^2)^2} \frac{d_r^2 - k_2^2 \lambda^2}{k_2^2} - L^2 = 0 \quad (1)$$

где L - расстояние между феррофлюидной ячейкой и камерой; k_1 и k_2 - порядки дифракционных максимумов ($k_2 > k_1$).

По регистрируемой дифракционной картине измеряется ΔY (расстояние между максимумами пиков) для соответствующих им значений k_1 и k_2 . По измеренному значению ΔY с помощью (1) определяется значение d_r - порядок дифракционной решетки (расстояние между силовыми линиями поля в данной плоскости межполюсного пространства магнитной системы).

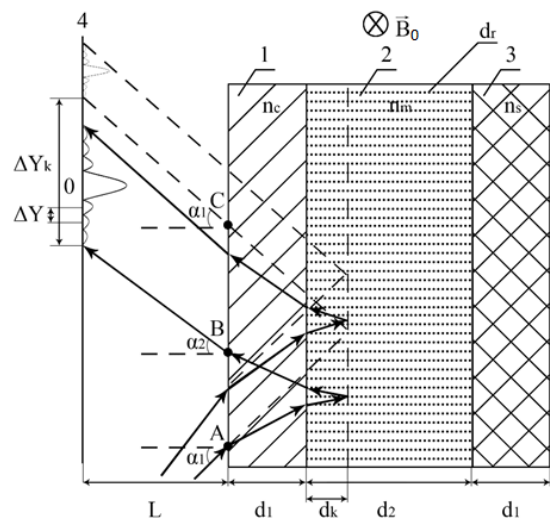


Рисунок 3. Схема распространения лучей лазерного излучения в феррофлюидной ячейке при регистрации дифракционной картины в отраженном свете: 1 - стенки феррофлюидной ячейки; 2 - слой магнитной жидкости в направлении, перпендикулярном магнитному полю, с толщиной, равной d_r ; 3 - экран.

На рис. 3 схема распространения лазерного излучения отраженного от феррофлюидной ячейки в магнитном поле B_0 .

Для регистрируемой дифракционной картины в отраженном свете были определены положения дифракционных максимумов по оси ОУ и величина их смещения ΔY_k , возникающая по причине преломления лазерного излучения на границах четырех сред: воздух – стекло, стекло – магнитная жидкость, магнитная жидкость – стекло, стекло – воздух. Экран 4 (специализированная камера 6) при проведении расчетов располагалась на расстоянии L от феррофлюидной ячейки. Лазерное излучение подавалось на феррофлюидную ячейку в точку А под углом $\alpha_1 = 45^\circ$. Далее излучение после преломления на стенках ячейки и попадало на дифракционную решетку, образованную наночастицами, с периодом d_r . Структура дифракционной решетки от которой происходит “отражение” располагается на расстоянии d_k от внутренней стенки феррофлюидной ячейки. В этом случае для определения значения ΔY нами было получено следующее соотношение:

$$\Delta Y = \frac{d_k}{d_r} \cdot \left[\frac{t_1}{\sqrt{1 - \frac{t_1^2}{d_r^2}}} - \frac{t_2}{\sqrt{1 - \frac{t_2^2}{d_r^2}}} \right] + d_1 \cdot n_m \cdot \left[\frac{\sqrt{1 - \frac{t_1^2}{d_r^2}}}{\sqrt{n_c^2 - n_m^2 \left(1 - \frac{t_1^2}{d_r^2}\right)}} - \frac{\sqrt{1 - \frac{t_2^2}{d_r^2}}}{\sqrt{n_c^2 - n_m^2 \left(1 - \frac{t_2^2}{d_r^2}\right)}} \right] + L \cdot \left[\frac{\sqrt{n_c^2 - n_m^2 \left(1 - \frac{t_1^2}{d_r^2}\right)}}{\sqrt{1 - \left(n_c^2 - n_m^2 \left(1 - \frac{t_1^2}{d_r^2}\right)\right)}} - \frac{\sqrt{n_c^2 - n_m^2 \left(1 - \frac{t_2^2}{d_r^2}\right)}}{\sqrt{1 - \left(n_c^2 - n_m^2 \left(1 - \frac{t_2^2}{d_r^2}\right)\right)}} \right] \quad (2)$$

$$t_1 = (2k_1 + 1) \cdot \lambda/2; \quad t_2 = (2k_2 + 1) \cdot \lambda/2 \quad (3)$$

где n_m - показатель преломления магнитной жидкости, n_c - показатель преломления прозрачной стеклянной стенки кюветы, d_k - расстояние от стенки ячейки до первого слоя наночастиц в магнитной жидкости, которая образует дифракционную решетку, k_1 и k_2 - порядки дифракционных максимумов ($k_2 > k_1$).

Анализ полученных зависимостей показывает, что по положению и характеру изменения максимумов от вариации магнитного поля, регистрируемые изображения будут различаться. Это необходимо будет учесть во время их обработки и при проведении сравнений.

Кроме того, полученные экспериментальные результаты позволили установить еще одну особенность. Степень контраста дифракционной картины от прошедшего через феррофлюидную ячейку лазерного излучения в несколько раз выше, чем в регистрируемой дифракционной картине в отраженном излучении. Для повышения степени контраста регистрируемой дифракционной картины в отраженном излучении необходимо одну из граней феррофлюидной ячейки, которая параллельна грани, на которую падает лазерное излучение, сделать из непрозрачного материала с низким коэффициентом отражения. Это повысит чувствительность квантового датчика к вариациям внешнего магнитного поля.

3. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Для проверки работоспособности разработанного нами квантового датчика было сделано следующее. Роль подвижного магнитного объекта выполнял постоянный магнит с индукцией B_m . При его движении на различных расстояниях от соленоида 3 (рис. 1) происходит смещение положения центрального максимума, изменяется форма максимумов в дифракционной картине, нарушается её симметричность. На рис. 4 в качестве примера представлен вид дифракционной картины, регистрируемой камерой, размещенной в зоне, где располагался экран 3 (рис. 2). Рис. 4.а соответствует отсутствию магнитного объекта рядом с соленоидом 3, в котором размещена феррофлюидная ячейка. Магнитное поле в феррофлюидной ячейке однородно. Рис. 4.б – соответствует одному из моментов движения рядом с соленоидом 3 магнитного объекта. Дифракционные картины на рис. 3 представлены после компьютерной обработки.

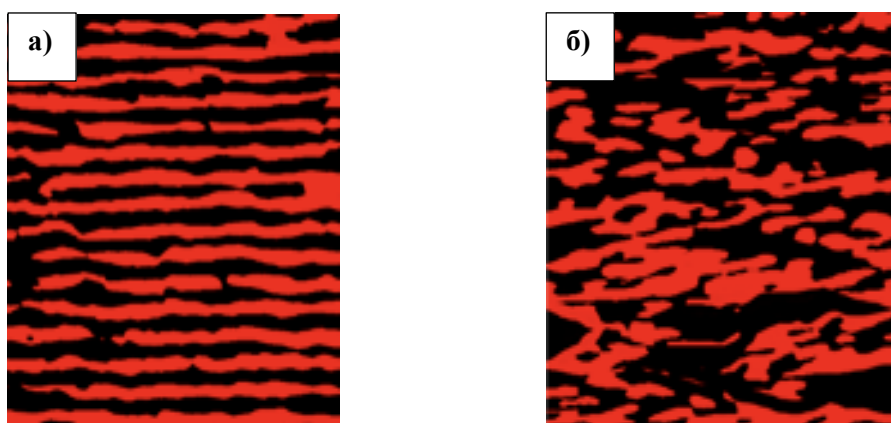


Рисунок 4. Дифракционная картина лазерного излучения в случае размещения магнитной жидкости: (а) в однородном магнитном поле; (б) в магнитном поле с вариациями от внешнего магнитного поля подвижного магнитного объекта.

Полученный результат на рис. 4 показывает, что магнитное поле, создаваемое подвижным объектом, внесло изменение в структуру силовых линий магнитного поля соленоида, в которых размещается феррофлюидная ячейка. Неоднородность магнитного поля в зоне размещения феррофлюидной ячейки существенно изменилась. Симметрия дифракционной картины нарушилась. Проведенные эксперименты и результаты их анализа показали, что представленная информация в данном виде не очень удобна для работы электронных систем обработки и передачи информации. Особенно для случая, когда квантовый датчик будет размещен на автономном объекте, например, подводный буй. Поэтому в зарегистрированной дифракционной картине выбирается строка (по ширине или высоте дифракционной ячейки). По этой строке строится распределение интенсивности I , регистрируемого лазерного излучения. На рис. 5 в качестве примера представлено данные распределения в дифракционной картине для прошедшего через феррофлюидную ячейку лазерного излучения. В одном случае магнитный объект отсутствовал в зоне размещения катушки индуктивности с феррофлюидной ячейкой. В другом случае (рис. 5.b) совершал движение. Распределение интенсивности I соответствует дифракционной картине, зафиксированной в определенный момент времени t . Например, когда искажения структуры силовых линий в катушке индуктивности достигли максимального значения.

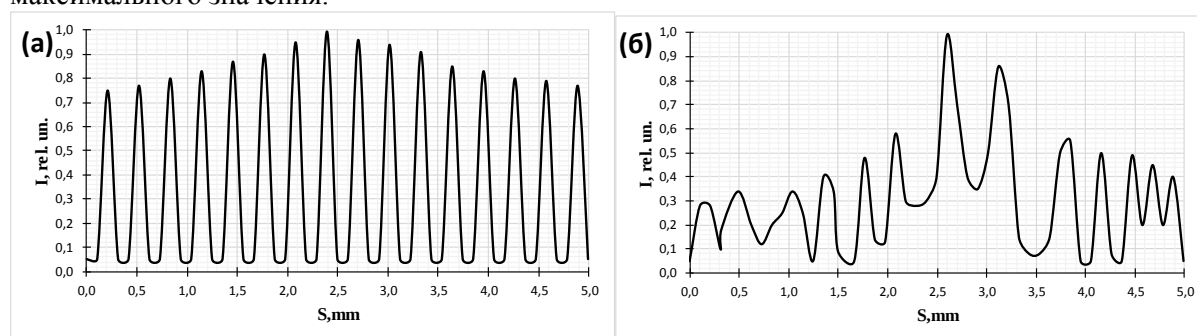


Рисунок 5. Зависимость интенсивности I от расстояния между силовыми линиями магнитного поля: а) в однородном поле B_0 ; б) в катушке индуктивности дополнительно присутствует магнитное поле B_m от подвижного объекта.

Проведенные исследования показали, что изменение положения и амплитуды максимумов в регистрируемой дифракционной картине (рис. 5.b) зависит от траектории и скорости движения магнитного объекта относительно положения феррофлюидной ячейки в катушке индуктивности. Наибольшее влияние на положение максимумов в регистрируемой

дифракционной картине оказывают силовые линии магнитного поля подвижного объекта, которые располагаются в одной плоскости с силовыми линиями катушки индуктивности. Поэтому в окончательном варианте квантового датчика наиболее целесообразно регистрировать изображение дифракционной картины по плоскостям ОХ и ОУ от прошедшего через феррофлюидную ячейку лазерного излучения. В плоскости ОZ от отраженного – излучения. Резкое изменение магнитного поля от подвижного магнитного объекта в этом направлении будет, когда он совершает маневр со всплытием с глубины

4. Заключение

Результаты экспериментов показали, что разработанный нами квантовый датчик, в котором учтены установленные особенности регистрации изображения дифракционной картины, позволяет определять наличие подвижного магнитного объекта в заданной зоне морской акватории. Использование для этих целей регистрируемые изменения в структуре дифракционной картины лазерного излучения связанные с изменением градиента магнитного поля исключает ошибку в измерениях. В ходе экспериментов было установлено, что длительное нахождение ячейки при правильном её расположении, которое мы определили для различных случаев, в постоянном магнитном поле никак не сказывается на чувствительности устройства.

Необходимо также отметить, что электроника, используемая в данном устройстве, обладает компактностью. Низкое энергопотребление комплектующих элементов позволяет непрерывно работать данному устройству в автономном режиме от аккумуляторов (в зависимости от ресурса батарей) до трех лет.

В результате проведенных экспериментов нами было установлено, что электромагнитное излучение при сканировании диаграммы направленности различных типов радиолокационных станций, которые используются в настоящее время для решения различных задач в водных акваториях [2, 3, 12], не вызывают искажений в структуре силовых линий в феррофлюидной ячейке, которые бы соответствовали нахождению недалеко от неё магнитного объекта. Это показывает высокую степень помехозащищенности разработанного нами квантового датчика.

5. Литература

- [1] Волобоев, В.П. Радиолокационная станция воздушного (морского) базирования, работающая в динамически сложных внешних условиях / В.П. Волобоев, В. П. Клименко, В.Д. Лосев // Математическое машиностроение и системы. – 2005. – № 4. – С. 131-142.
- [2] Мельников, Ю. П. Особенности оценки методики применения переотраженных сигналов «посторонних» РЛС для скрытного определения координат кораблей и летательных аппаратов // Информационно-измерительные системы. – 2015. – № 4. – С. 108-113.
- [3] Podstrigaev, A.S. Features of the Development of Transceivers for Information and Communication Systems Considering the Distribution of Radar Operating Frequencies in the Frequency Range / A.S. Podstrigaev, A.V. Smolyakov, V.V. Davydov, N.S. Myazin, M.G. Slobodyan // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – 11118 LNCS. – P. 509-515.
- [4] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.
- [5] Petrov, A.A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashev, V.V. Davydov, N.V. Ivanova, N.S. Rodugina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012032.
- [6] Aleksandrov, E.B. Modern radio-optical methods in quantum magnetometry / E.B. Aleksandrov, A.K. Vershovskii // Physics-USpekhi. – 2009. – Vol. 52(6). – P. 573-601.

- [7] Vershovskii, A.K. Micro-scale three-component quantum magnetometer based on nitrogen-vacancy color centers in diamond crystal / A.K. Vershovskii, A.K. Dmitriev // *Technical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 41(4). – P. 393-396.
- [8] Ushakov, N.A. Measurement of dynamic interferometer baseline perturbations by means of wavelength-scanning interferometry / N.A. Ushakov, L.B. Liokumovich // *Optical Engineering*. – 2014. – Vol. 53(11). – P. 114103.
- [9] Bisyarin, M.A. Rayleigh backscattering from the fundamental mode in step-index multimode optical fibers / M.A. Bisyarin, O.I. Kotov, A.H. Yartog, L.B. Liokumovich, N.A. Ushakov // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(2). – P. 354-364.
- [10] Давыдов, В.В. Методика измерения чувствительности ядерно-резонансных магнитометров с текущей жидкостью / В.В. Давыдов, В.И. Дудкин, Е.Н. Величко // *Измерительная техника*. – 2016. – № 2. – С. 50-54.
- [11] Petrov, A.A. Some direction of quantum frequency standard modernization for telecommunication systems / A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – 11118 LNCS. – P. 641-648.
- [12] Lenets, V.A. New method for testing of antenna phased array in X frequency range. / V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, V.V. Davydov, N.S. Rodygina, A.V. Moroz // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012037.
- [13] Давыдов, В.В. Измерение магнитной восприимчивости константы Кюри коллоидных растворов в феррофлюидных ячейках методом ядерного магнитного резонанса / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин // *Измерительная техника*. – 2017. – № 5. – С. 55-59.
- [14] Logunov, S.E. Visualizer of magnetic fields / S.E. Logunov, A.Yu. Koshkin, V.V. Davydov, A.A. Petrov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 741(1). – P. 012092.
- [15] Logunov, S.E. Quantum analyzer of force lines structure at magnetic fields / S.E. Logunov, M.G. Vysocky, V.V. Davydov, A.Yu. Koshkin, V.Yu. Rud' // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 917(5). – P. 052058.
- [16] Myazin, N.S. New method for determining concentrations of the mixture components during rapid control / N.S. Myazin, S.E. Logunov, V.V. Davydov, V.Yu. Rud', N.M. Grebenikova, V.V. Yushkova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 929(1). – P. 012064.
- [17] Тютин, Л.А. Способ магнитно-резонансной томографии и устройство для его осуществления / Л.А. Тютин, Ю.И. Неронов // Патент на изобретение RUS 2063702.
- [18] Logunov, S.E. New method of researches of the magnetic fields force lines structure / S.E. Logunov, M.G. Vysocky, V.V. Davydov, M.S. Masing // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012093.
- [19] Кузнецов, П.А. Композиционный материал для защиты от электромагнитного излучения / А.П. Кузнецов, Б.В. Фармаковский, А.Ю. Аскинази, Т.В. Песков, С.Б. Бибииков, Э.И. Куликовский, Я.В. Орлова // Патент на изобретение RUS 2324989 19.06. 2006.
- [20] Gorynin, I.V. III International scientific and engineering conference “Nanotechnologies of functional materials”: Additive technologies based on composite powder nanomaterials / I.V. Gorynin, A.S. Oryshchenko, V.A. Malyshevskii, B.V. Farmakovskii, P.A. Kuznetsov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2015. – Vol 56(9-10). – P. 519-524.

Features of the construction of the registration scheme of optical images in an autonomous quantum magnetic field sensor

S.E. Logunov¹, V.V. Davydov^{1, 2}, M.G. Vysotsky¹, V.I. Dudkin³, D.A. Puzko¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, St. Petersburg, Russia, 195251

²All-Russian scientific Research Institute of Phytopathology, Institute 5, Moscow Region, Russia, 143050

³The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Bolshevikov 22/1, St. Petersburg, Russia, 193232

Abstract. The article describes the design of an autonomous quantum sensor for detecting variations of the magnetic field. The features of the regulation of the diffraction pattern of laser radiation using a ferrofluid cell placed in a uniform constant magnetic field are established. The optimal parameters for the design of the ferrofluid cell, magnetic fluid and laser radiation were determined. The experimental results of the study of the variation of the magnetic field from moving marine objects are presented.