

Определение местоположения магнитного диполя с помощью квантового магнитометра с оптической накачкой

М. В. Сергеева, Р. А. Кузьмин, С. В. Ермак, В. В. Семёнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
sergeeva2.mv@edu.spbstu.ru

Аннотация. В докладе показаны возможности использования квантовых магнитометров с оптической накачкой для определения местоположения магнитного диполя. Разработан и опробован метод определения расстояния до магнитного диполя и направления на него с помощью лабораторной установки квантового магнитометра. Приведены результаты измерений, оценены погрешности определения местоположения магнитного диполя.

Ключевые слова: квантовый магнитометр, магнитный диполь, постоянные и медленно меняющиеся магнитные поля

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач квантовой магнитометрии является дистанционный поиск магнитных аномалий, вызванных как естественными геологическими образованиями, так и наличием скрытых искусственных объектов под землей и в океанской среде. [1], [2], [3].

При решении подобных задач используют различного типа магнитометры, характеристики которых в зависимости от схемного построения и принципа действия радикально различаются, что требует рационального обзора той или иной конструкции измерительного модуля в зависимости от необходимой точности определения координат магнитной аномалии. Последний параметр напрямую определяется чувствительностью магнитометра и его способностью измерять абсолютное значение магнитного поля вне зависимости от его направления в пространстве. В этом аспекте наиболее пригодными измерительными устройствами для магниторазведки являются квантовые магнитометры с оптической накачкой (КМОН), которые, в отличие от феррозондов и СКВИДов, не требуют предварительной градуировки показаний. В резонансных КМОН используется эффект радиооптического резонанса в оптически ориентированных атомах при воздействии на них радиочастотного поля, частота которого является мерой магнитной индукции.

В ассортименте современных КМОН существуют два основных вида измерительных схем – самогенерирующие и с низкочастотной модуляцией резонансных условий [4].

В самогенерирующем магнитометре используется модуляция света накачки в камере поглощения на частоте, близкой к частоте свободной прецессии, в магнитометрах второго типа используется периодическое прохождение магнитного резонанса с низкой звуковой частотой, модулирующей либо измеряемое магнитное поле, либо частоту индуцирующего магнитный резонанс радиочастотного поля.

При определении координат магнитного объекта обычно используют его аппроксимацию в виде простого точечного магнитного диполя, пространственное распределение магнитного поля которого хорошо известно. Однако, даже в этом случае измерительному процессу сопутствует весьма нетривиальная задача, которая сводится к решению громоздких уравнений шестой степени, не имеющих однозначного ответа [5].

Поэтому в практике магниторазведки обычно применяют так называемую методику адаптивного поиска, в соответствии с которой по сигналу магнитометра, установленного на подвижном носителе, записывается информация о магнитном поле в окрестности местонахождения магнитной аномалии [6]. При этом каждая последующая траектория движения носителя определяется информацией, собранной во время предыдущей траектории, что позволяет после обработки данных вычислить координаты искомой магнитной аномалии. При решении подобной задачи приходится учитывать целый комплекс факторов, ограничивающих точность измерений. К числу таких факторов относятся:

- естественные и искусственные вариации постоянного магнитного (геомагнитного) поля;
- ориентационная зависимость магнитного поля точечного диполя по закону $(1+3\cos^2\theta)^{1/2}$, где θ – угол между осью диполя и радиусом вектором, определяющим положение магнитометра;
- ориентационные сдвиги частоты КМОН, вызванные сменой направления движения носителя в магнитном поле.

В настоящей работе анализируются влияние вышеперечисленных факторов на точность измерений магнитного поля точечного источника по сигналу

радиооптического резонанса в оптически ориентированных парах цезия.

II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Стандартная практика поиска магнитных аномалий предполагает движение квантового магнитометра на подвижной немагнитной платформе вблизи места локализации объекта поиска. В момент прохождения платформы вблизи аномалии частота магнитометра максимально изменяется, причем знак этого изменения зависит от ориентации объекта в геомагнитном пространстве. В лабораторных условиях, где присутствуют различные приборы и металлические конструкции, однородность магнитного поля существенно зависит от координаты размещения квантового магнитометра, что делает невозможным поиск магнитного объекта путем изменения положения магнитометра в пространстве лаборатории. Для преодоления этой трудности в наших экспериментах использовался способ, в котором магнитометр оставался неподвижным, а напряженность магнитного поля точечного источника регистрировалась по сдвигу частоты радиооптического резонанса при периодической инверсии полюсов магнитного диполя. В качестве макета магнитометра использовался лабораторный стенд, предназначенный для исследования сигналов радиооптического резонанса в оптически ориентированных парах цезия-133. Оптический тракт макета размещался в системе катушек Гельмгольца, создававших искусственное магнитное поле вдоль оптической оси. При этом достигалась максимальная чувствительность сигнала радиооптического резонанса к вариациям магнитного поля, создаваемым различными источниками. Для наших экспериментальных условий этот параметр составлял величину 0,014 нТл в полосе регистрации 1 Гц. Для повышения отношения сигнал-шум применялась низкочастотная модуляция частоты радиополя с последующим синхронным детектированием полезного сигнала. В зависимости от частоты радиополя сигнал наблюдался либо на удвоенной частоте модуляции в центре резонансной линии, либо на частоте модуляции при отстройке частоты радиополя от резонансного значения (рис. 1а). В пределах ширины линии поглощения амплитуда детектируемого сигнала линейно зависела от отстройки радиочастотного поля относительно резонансного значения.

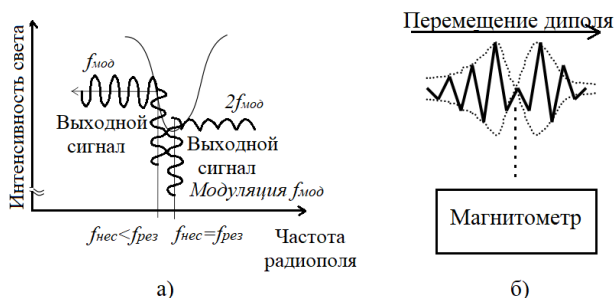


Рис. 1. Схема детектирования сигнала радиооптического резонанса: а) модуляционная методика регистрации; б) форма сигнала на выходе синхронного детектора при периодической инверсии полюсов движущегося магнитного диполя

При периодической инверсии полюсов перемещаемого магнитного диполя (в данном эксперименте магнитный диполь представляет собой катушку с изменяющимся по гармоническому закону током) вблизи магнитометра, временная зависимость амплитуды сигнала на выходе фильтра нижних частот синхронного детектора имела вид, показанный на рис. 1б (частота модуляции тока через катушку была выбрана меньше верхней границы фильтра нижних частот на выходе синхронного детектора). Как следует из рис. 1б при движении диполя в окрестности кратчайшего расстояния до магнитометра сдвиг его резонансной частоты, вызванный магнитным полем диполя H_{CA} в точке C достигает нулевого значения, что позволяет в этот момент времени построить перпендикуляр AC , соединяющий диполь с магнитометром (рис. 2).

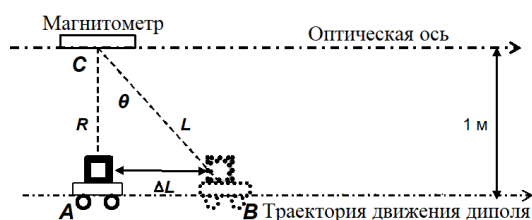


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению расстояния от магнитометра до движущегося магнитного диполя по траектории, параллельной оптической оси

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Типичные осциллограммы наблюдаемого сигнала для различных ориентаций движущегося по прямолинейной траектории магнитного диполя в точке A (рис. 2) представлены на рис. 3а. и рис. 3б. На рис. 3в и рис. 3г приведены осциллограммы записей вариаций лабораторного магнитного поля и собственных шумов магнитометра.

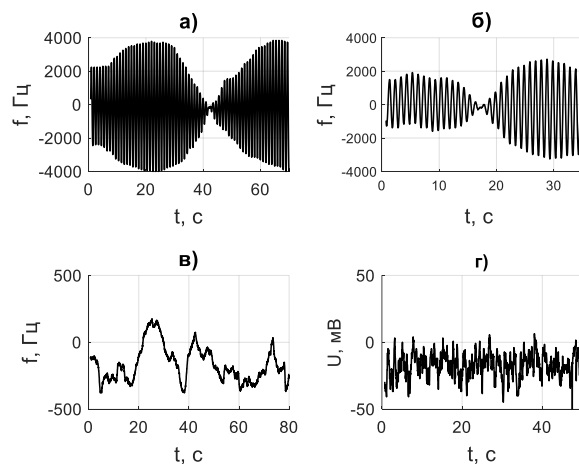


Рис. 3. Осциллограммы вариаций частоты радиооптического резонанса при движении магнитного диполя по прямолинейной траектории параллельно оптической оси магнитометра: а) под углом $\alpha=0^\circ$, б) под углом $\alpha=90^\circ$, в) вариации лабораторного магнитного поля, г) собственный шум магнитометра при отключенном радиочастотном поле

Далее в соответствии с рис. 2 регистрировался сдвиг частоты магнитометра, вызванный магнитным полем

диполя H_{BA} в точке C при прохождении диполя через точку B . Через отношение измеренных значений H_{CA} и H_{BA} для фиксированного смещения диполя ΔL по прямолинейной траектории его движения несложно определить расстояние R и угол θ , указывающий направление от магнитометра на диполь в точке B .

В эксперименте оценивались значения R и θ для трех углов α ориентаций оси диполя относительно оптической оси магнитометра: 0° , 90° и 45° .

С учетом известной ориентационной зависимости магнитного поля диполя для этих трех случаев несложно получить следующие уравнения:

$$\alpha = 0^\circ: \frac{H_{BA}}{H_{CA}} = 0,5 \cdot \cos^3 \theta \cdot (1 + 3 \cdot \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$\alpha = 45^\circ$ (в предположении, что ось диполя в точке B направлена по линии BC):

$$\frac{H_{BA}}{H_{CA}} = 2 \cdot \cos^3 \theta \cdot (1 + 3 \cdot \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\alpha = 90^\circ: \frac{H_{BA}}{H_{CA}} = 2 \cdot \cos^3 \theta \cdot (1 + 3 \cdot \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Значения H_{BA} и H_{CA} в эксперименте измерялись при фиксированном положении диполя в точках A и B по средневзвешенной частоте магнитного резонанса, соответствующей магнитному полю в этих точках. Относительная погрешность измерений определялась флуктуациями лабораторного поля (рис. 3а) и составляла в среднем 10 % в точке A и примерно 20 % в точке B . Отличие погрешностей измерений в этих точках однозначно связано с величиной детектируемого сигнала, амплитуда которого обратно пропорциональна кубу расстояния от магнитометра до диполя. Так, например, при $\Delta L = 1$ м и угле $\theta = 45^\circ$ его измеренные значения при $\alpha = 0^\circ$, 90° и 45° составляли соответственно 50° , 56° и 35° , что соответствует указанному выше диапазону измерительной погрешности.

Аналогичные измерения расстояния от магнитометра до диполя проводились при фиксированном положении диполя на оптической оси магнитометра. При этом оценивалась погрешность измерений в зависимости от кратности увеличения расстояния между диполем и магнитометром. Оказалось, что при двукратном увеличении этого расстояния с 1 м до 2 м, погрешность измерений возрастает примерно на порядок (с 2 % до 19 %), что находится в близком соответствии с результатами измерений расстояния до диполя в варианте на рис. 2.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применимости изложенной экспериментальной методики при обнаружении магнитных объектов на относительно небольших расстояниях, не превышающих нескольких метров. При этом, как показал эксперимент (эксперимент 1), основная измерительная погрешность поискового магнитометра связана с вариациями внешнего магнитного поля,

вызванных как естественными причинами (например, в период магнитных бурь), так и магнитными наводками, генерируемых промышленными источниками. Для минимизации этой погрешности следует использовать градиентометр – систему из двух магнитометров, синхронные показания которых позволят минимизировать погрешности, вызванные магнитными вариациями, не связанные с искомым объектом.

Для наших экспериментальных условий отношение вариаций лабораторного поля к предельной чувствительности магнитометра составляет величину ~ 1000 . Таким образом, тысячекратное подавление этих вариаций в схеме градиентометра позволит на порядок (до 10 м) увеличить измеряемое расстояние до объекта при погрешности измерений 2 %.

Присутствие магнитной аномалии изменяет не только напряженность полного вектора магнитного поля, измеряемого КМОН, но и направление этого поля по отношению к оптической оси магнитометра. При этом полигонные условия поиска магнитной аномалии (гипотетический эксперимент 2) предполагают не движение диполя относительно неподвижного магнитометра, как это осуществлялось в эксперименте 1, а движение магнитометра относительно магнитного объекта. Инверсия направления магнитного момента диполя в эксперименте 1 полностью эквивалентна инверсии рабочего магнитного поля в магнитометре в эксперименте 2. В КМОН на парах щелочных металлов это приводит к так называемым ориентационным сдвигам частоты, которые вносят соответствующую ориентационную погрешность [4]. Величина этой погрешности зависит от сорта используемого рабочего вещества и для паров цезия в геомагнитном поле может достигать значительных величин (на уровне 10 нТл в геомагнитном поле), сравнимых с величиной магнитного поля, создаваемого искомым магнитным объектом в зоне магнитометра. Для уменьшения влияния ориентационной погрешности КМОН на измерения координат магнитной аномалии целесообразно использовать магнитометры на изолированной линии радиооптического резонанса (например, на парах калия), где ориентационная погрешность принципиально исключена [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Поиск подводных лодок квантовой техникой / [Электронный ресурс] // Дзен: [сайт]. – URL: <https://dzen.ru/a/YiJJ7QsCYQRGZnBF>
- [2] Арбузов С.О. Магниточувствительные поисковые приборы // Специальная техника. 2000. №. 6. С. 12-19.
- [3] Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2008. №. 2. С. 8-17.
- [4] Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скороцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. Наука, 1972.
- [5] Семенов В.Г., Дзария Г.Н. Решение обратной задачи по определению дипольного магнитного момента // Метрология. 1977. №. 12. С. 29-34.
- [6] Polvani D. Magnetic guidance of autonomous vehicles (part 2) // Proceedings of the 1987 5th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. IEEE, 1987. Т. 5. С. 257-264.
- [7] Александров Е.Б., Вершовский А.К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. №. 6. С. 605-637.