

Практическое применение квантовых магнитометров с оптической накачкой от АО «НПП «Радар ммс»

Георгий АНЦЕВ, д.т.н.,
Лауреат Государственной премии,
Герой Труда, генеральный директор,
генеральный конструктор,
Андрей РУНОВ,
заместитель директора НПҚ,
Владимир АВЕРКИЕВ,
главный научный сотрудник,
Андрей ДОБРИНЕСКИЙ,
начальник лаборатории
первичных преобразователей НПҚ

В статье приводятся примеры практического применения квантовых магнитометров с оптической накачкой, произведенные АО «НПП «Радар ммс». Рассматриваются три направления применения: съемка магнитного поля, поиск магнитных объектов и коррекция инерциальных навигационных систем.

Введение

Магнитометры активно применяются для решения разных задач: проведение магнитных съемок при геологоразведочных работах, поиск и обнаружение магнитных объектов, автономная коррекция инерциальных навигационных систем подвижных объектов, ориентация и стабилизация космических спутников по магнитному полю Земли (МПЗ) и исследование магнитных полей планет, индикация и контроль ядерных взрывов, прогноз землетрясений.

Решаемая задача устанавливает требования к магнитометру и магнитометрической системе. Так, в задачах, в которых требуется установка магнитометра на подвижный носитель, необходимо учитывать магнитные помехи, создаваемые этим носителем, и возможную ограниченность рабочей зоны (зоны чувствительности) магнитометра. При использовании магнитометров на космических аппаратах особые требования предъявляются к их стойкости к радиационному воздействию, а для решения задач обнаружения магнитных объектов требуется высокая чувствительность магнитометра.

Несмотря на различие требований, разрабатываемые магнитометры зачастую являются многоцелевыми, то есть применяются для решения разных задач и на разных носителях. В первую очередь, это относится к квантовым магнитометрам с оптической накачкой (МОН). Начиная с 2008 г., в АО «НПП «Радар ммс» ведется разработка и производство таких магнитометров. В этой статье представлены примеры их практического применения.

Съемка магнитного поля

Магниторазведка, заслуженно считающаяся одним из наиболее эффективных методов разведочной геофизики, широко применяется практически на всех стадиях геологоразведочных работ при поисках железорудных и других видов полезных ископаемых (включая углеводородное сырье [3]), при геологическом картировании, структурных исследованиях и т. д. Не менее важную роль детальная высокоточная магнитометрия играет при археологических исследованиях и инженерных изысканиях.

Активно магнитометрия в поисково-разведочных целях стала применяться в начале прошлого века [1]. Так, в 1919 г. под руководством академика И. М. Губкина, инженеров П. П. Лазарева и А. Д. Архангельского именно с магнитометрии началось систематическое изучение Курской магнитной аномалии, приведшее в дальнейшем к открытию уникальных месторождений магнетитовых железистых кварцитов в Курской, Белгородской и Орловской областях России.

За годы развития метода магниторазведки сменилось, по крайней мере, четыре типа магнитометров. На первом этапе в течение более 50 лет использовались оптико-механические приборы, основанные на принципе магнитных весов. В дальнейшем были разработаны феррозондовые, протонные и квантовые магнитометры с оптической накачкой. В настоящее время в магниторазведке преимущественно применяются ядерно-прецессионные (протонные) и квантовые магнитометры с оптической накачкой. Для разных условий проведения съемки серийно выпускаются магнитометры, специализированные для проведения наземных, скважинных, морских и авиационных работ.

Основным магнитометром, используемым в России для нужд геофизических работ, до последнего времени являлся магнитометр на базе датчика CS (CS-2 и CS-3) фирмы Scintrex (Канада). Однако с введением санкций западных стран в отношении России эта компания прекратила их поставку. Однокамерные цезиевые МОНы, разработанные и производимые АО «НПП «Радар ммс», являются полным аналогом канадских датчиков и могут применяться для решения тех же геофизических задач. В частности, на базе однокамерного датчика разработана и серийно производится магнитовариационная станция (МВС).

Внешний вид МВС представлен на рис. 1. Эта станция предназначена для выполнения функций как собственно МВС с привязкой магнитных измерений ко времени GPS или UTC, так и функций базовой станции GPS/ГЛОНАСС (постобработка).

В состав МВС входят:

- однокамерный цезиевый датчик (МОН);
- блок сбора, первичной обработки и передачи информации;



Рис. 1. Магнитовариационная станция производства АО «НПП «Радар ммс»



Рис. 2. Буйковая МВС, производства АО «НПП «Радар ммс»

- эксплуатационное обеспечение (тренога, аккумулятор и т. д.);
- программное обеспечение для приема и просмотра данных для операционных систем Windows (не ниже 7-й версии) и Android (не ниже 4-й версии).

При этом передача данных для просмотра может осуществляться как по кабелю Ethernet, так и по беспроводной сети Wi-Fi. Все составные части МВС, кроме эксплуатационного обеспечения, разработаны и производятся АО «НПП «Радар ммс».

Для проведения морских магнитных съемок в АО «НПП «Радар ммс» разработана и опробована плавающая буйковая МВС (рис. 2). Для применения в этой МВС выбран неориентируемый датчик – КСТС-магнитометр. Применение именно этого магнитометра обосновано наличием неконтролируемых качаний буя на волнах и его вращением под воздействием ветра, которые могут приводить к выходу за границы рабочей зоны цезиевых МОНов. Особенно острой эта проблема становится в низких широтах, а начинает довольно часто проявляться – в средних. Применение всеширотного КСТС-магнитометра позволяет полностью устранить эту проблему.

В состав буйковой МВС входит спутниковая навигационная система (СНС) для привязки магнитных измерений ко времени GPS или UTC, а также система радиосвязи для передачи магнитных измерений и статусов работоспособности в режиме реального времени на судно сопровождения. Кроме этого, при глубинах моря до 2 км буйковая МВС может быть заякорена, что позволяет фактически исключить из ее измерений помеху из-за перемещений (дрейфа) буя в магнитном поле Земли.

Благодаря высокой производительности и точности наибольшие объемы магнитных съемок проводятся в авиационном варианте. Современные спутниковые навигационные системы с дифференци-

альной коррекцией данных позволяют определять положение точек наблюдений с субметровой точностью. Точная плановая привязка, в свою очередь, позволяет значительно сократить общую погрешность аэромагнитной съемки и построить уникальные по точности карты магнитного поля.

В последние годы большую популярность получили съемки магнитного поля в труднодоступных районах с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [4]. Обладая относительно небольшой массой и широкой рабочей зоной, четырехкамерный магнитометр на цезии отлично подходит для размещения на БПЛА. Это подтверждается практикой применения четырехкамерного датчика, устанавливаемого на БПЛА вертолетного типа также производства АО «НПП «Радар ммс» для проведения магнитных съемок в том числе в экстремальных условиях Полярного Урала (рис. 3).

В последние годы при проведении магниторазведочных работ все чаще используются магнитоградиентометры [5]. Магнитоградиентометр (МГ) представляет собой измерительную систему, в состав которой входят два или более магниточувствительных преобразователя [6]. Разностный сигнал такой системы пропорционален расстоянию между преобразователями (база МГ) и свободен от влияния геомагнитных вариаций, что является одним из главных достоинств МГ. Кроме того, градиентометрические измерения дают более контрастную реакцию на приповерхностные магнитные аномалии по сравнению с одиночными модульными измерениями.

Измерители вектора градиента ВМИ G строятся на основе модульных преобразователей (квантовых магнитометров). Для обеспечения измерения всех компонентов вектора G , свободных от геомагнитных вариаций, необходимы как минимум четыре магнитометра, размещенных, к примеру, на крыльях самолета, на кромке киля и хвостов-



Рис. 3. БПЛА вертолетного типа АО «НПП «Радар ммс» во время выполнения магнитной съемки на Полярном Урале



Рис. 4. Легкомоторный самолет Л-42М с установленной магнитоградиентометрической системой производства АО «НПП «Радар ммс»

вой части фюзеляжа. Однако измерение отдельных компонентов вектора \mathbf{G} также оказывается полезным при проведении магнитных съемок.

Измерение вертикального компонента градиента вдоль маршрутов съемки фактически аналогично двухуровневой магнитной съемке (на двух разных высотах) и позволяет полнее решать обратную задачу на этапе интерпретации данных. Измерение поперечного компонента градиента (поперек направления движения) позволяет строить «виртуальные» маршруты для того, чтобы либо снизить трудозатраты (число фактических маршрутов), либо повысить точность межмаршрутной интерполяции и подробность итоговой карты поля. Измерения продольного градиента могут использоваться для так называемого дифференциального метода учета вариаций, который особенно актуален при проведении морских магнитных съемок с судна в удаленных от берега районах Мирового океана.

Летом 2021 г. ФГБУ «ВСЕГЕИ» были выполнены работы по проведению магнитной съемки вблизи Норильска с использованием легкомоторного самолета Л-42 М. При съемке использовался градиентометр производства АО «НПП «Радар ммс».

Два однокамерных цезиевых датчика располагались на законцовках крыльев, а еще один был установлен на выносной штанге на носу самолета (рис. 4). Измеряемые продольный и поперечный компоненты

градиента магнитного поля Земли позволили построить более подробную карту магнитных аномалий в сравнении со съемкой того же участка в предыдущие годы.

Литература

1. Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А. Специальная магнитометрия. Изд. «Наука». Санкт-Петербург. 2022.
2. Аверкиев В. В., Бутова В. В., Могилевкин В. А. Компенсация магнитных помех авиационных носителей. Разведка и охрана недр. 2001. № 9. С. 52–58.
3. Березкин В. М., Киричек М. А., Кунарев А. А. Применение геофизических методов разведки для прямых поисков месторождений нефти и газа. Москва. «Недра». 1978.
4. Паршин А. В., Цирель В. С., Анцев В. Г. Настоящее и будущее беспилотной аэрогеофизики в России. Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 33–38.
5. Цирель В. С. Аэромагнитная градиентометрия. Достоинства и недостатки. Материалы международной школы-семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород. Казань. 2013. С. 231–236.
6. Волковицкий А. К., Каршаков Е. В., Павлов Б. В. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы. Том I. Принципы измерений и структура магнитоградиентных комплексов. Москва. ИПУ РАН. 2018.