



МНОГОКАНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БЕСПИЛОТНОМ ВОЗДУШНОМ СУДНЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

И.Н. Злыгостев^{1,2}, М.И. Эпов^{1,2}, А.В. Савлук¹, В.Н. Глинских^{1,3}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*ООО «СканАэро», Новосибирск, 630090, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4г, оф. 215, Россия,*

³*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: ZlygostevIN@ipgg.sbras.ru*

Разработан, изготовлен и успешно прошел комплексные предварительные испытания макетный образец прототипа многоканальной информационно-измерительной системы для измерения вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ), применимой для дальнейшего развития технологии разновысотной аэрогеофизической разведки с борта беспилотного воздушного судна (БВС) и программный продукт, позволяющий наряду с измерением значения модуля индукции МПЗ определять значения его компонент.

Аэромагнитная съемка; вектор индукции земного магнитного поля; беспилотное воздушное судно; сплайн-сглаживание

MULTICHANNEL INFORMATION-MEASURING SYSTEM ON AN UNMANNED AIRCRAFT FOR MEASURING THE TOTAL INDUCTION VECTOR OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

I.N. Zlygostev^{1,2}, M.I. Epov^{1,2}, A.V. Savluk¹, V.N. Glinskikh^{1,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*LTD ScanAero, Kutateladze Str., 4g, 215, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: ZlygostevIN@ipgg.sbras.ru*

A prototype of a multichannel information-measuring system for measuring the vector of induction of the Earth's magnetic field (EMF) was developed, manufactured and successfully passed a complex of preliminary tests, which is applicable for the further development of technology for airborne geophysical reconnaissance at different altitudes from an unmanned aerial vehicle (UAV) and a software product that allows with the measurement of the value of the induction modulus of the EMF, determine the values of its components.

Aeromagnetic survey; Earth's vector magnetic field; unmanned aerial vehicle; spline smoothing

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных и широко используемых геофизических методов является магниторазведка, основанная на измерении индукции магнитного поля Земли. Пространственное распределение индукции магнитного поля Земли определяется наличием и характеристиками

(размерами, формой, магнитной восприимчивостью, намагниченностью) геологических объектов в земных недрах. Результатом измерений в магниторазведке является построение карт аномальной индукции магнитного поля, на основании которых решаются обратные задачи и делаются выводы о строении земных недр или местоположении подповерхностных объектов техногенного происхождения.

Обратные задачи относятся к классу некорректных, поэтому для их решения необходимо использовать дополнительную априорную информацию, например, об общем геологическом строении исследуемого района или характеристиках поисковых объектов.

Поскольку индукция магнитного поля есть величина векторная, то измерение ее компонент дает дополнительную информацию в сравнении с измерением только амплитуды, которая позволяет увеличить точность решения обратных задач и сократить области их неоднозначности.

Использование технологии разновысотной аэромагнитной съемки с борта БВС [Еров et al., 2015] дает возможность построения пространственного распределения вектора магнитной индукции в верхнем полупространстве и детального исследования ее тонкой структуры вблизи земной поверхности. Для этого необходима аппаратура, способная измерять полный вектор магнитной индукции в процессе движения мобильного низколетающего носителя. Особенностью технологии разновысотной аэромагнитной съемки [Еров et al., 2015] является использование магнитометра, не жестко связанного с носителем, а подвешенного на гибком кабеле-тросе, что требует автоматического пересчета измеренного вектора индукции магнитного поля в систему координат носителя.

Целью настоящей работы является описание прототипа размещаемой на БВС многоканальной информационно-измерительной системы с гибко подвешенным магнитометром для измерения полного вектора магнитной индукции.

АППАРАТУРА, ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА, МЕТОДИКА

Как было отмечено, измерение полного вектора магнитной индукции при движении носителя аппаратуры сталкивается с рядом трудностей. Основная из них вызвана тем, что при движении носителя векторный магнитометр, подвешенный на несущем кабеле-тросе, хаотично изменяет свою ориентацию в пространстве, т. е. измерения происходят в собственной системе координат магнитометра, произвольно ориентированной относительно системы координат, привязанной к беспилотному носителю. Для восстановления вектора в системе координат носителя необходимо получение дополнительной информации, которую формирует описываемая многоканальная информационно-измерительная система. Эта информация о времени, координатах, векторах угловой скорости и ускорения датчика (получаемой от жестко связанной с ним инерциальной навигационной системы). Также используются значения скорости и направлений движения приемника спутниковой навигационной системы. Следует отметить, что для улучшения точности измерений при увеличении числа измерительных каналов необходима их синхронизация и специальная обработка полной совокупности зарегистрированных сигналов [Ширман, 1974; Царьков, 1980].

Для выделения компонент вектора магнитной индукции в стабилизированной системе координат, привязанной к носителю, разработан программный комплекс «ВЕКТОР-Т» [Савлук, Злыгостев, 2018]. При этом используется дополнительная информация от приемника спутниковой навигационной системы и угол склонения регионального магнитного поля. В этом случае ось X фиксированной системы координат направлена по магнитному меридиану с севера на юг.

При тестировании работы измерительного комплекса (камеральная обработка полевых данных, полученных на различных объектах) выявлен важный недостаток: при наличии высококонтрастных аномалий с большим пространственным градиентом модуля вектора магнитной индукции (значение амплитуды градиента превышает 10 нТл/м) программа привязки координат хаотично передвигающегося датчика индукции к координатам носителя не дает удовлетворительных результатов. Кроме того, проведение расчетов требует значительных временных затрат.

Устранение этого недостатка возможно при использовании информации о пространственной ориентации (углов Эйлера) векторного магнитометра, получаемой от модуля инерциальной навигационной системы (ИНС).

Для исследования возможностей такого подхода создан прототип многоканальной информационно-измерительной системы (МИИС) с использованием разработанного оригинального модуля ИНС.

Функциональная схема прототипа МИИС представлена на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема МИИС, СНС – спутниковая навигационная система

МИИС состоит из измерительного блока и блока электронного обеспечения. Все составные части МИИС, за исключением измерительного блока, размещены на общей платформе и жестко соединены между собой.

Для уменьшения паразитного влияния ферромагнитных элементов МИИС на магнитную индукцию измерительный блок выполнен в виде выносной гондолы, удаленной от несущей платформы на расстояние около 1,5 м и соединенной с блоком электронного обеспечения несущим кабелем-тросом.

В прототипе использован векторный магнитометр FGM3D/75 с диапазоном измерения компонент вектора индукции ± 75000 нТл, разрешением 0,07 пкТл, общей погрешностью измерений ± 7 нТл.

Модуль ИНС выполнен на основе микросхемы MPU-6000 (МЭМС) и микропроцессора STM32F103C8T. Трехосный гироскоп обеспечивает измерение угловой скорости в диапазонах ± 250 , ± 500 , ± 1000 , и $\pm 2000^\circ/\text{сек}$ с относительной погрешностью $\pm 3\%$. Трехкомпонентный акселерометр измеряет ускорение в диапазонах $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$ с относительной погрешностью $\pm 3\%$. Выходная информация предоставляется в цифровом виде (16-тиразрядное АЦП) с максимальной частотой 400 Гц.

В прототипе использован стандартный приемник СНС разработки КБ «НАВИС». Он принимает сигналы в диапазоне L1 системы GPS и ГЛОНАСС.

Ток потребления от аккумулятора составляет около 0,3 А, что обеспечивает непрерывную работу в течение 10 часов. Общая масса не превышает 0,5 кг.

Информация со всех измерительных каналов поступает в блок электронного обеспечения на специализированный процессор, который выполняет совместную обработку и синхронизацию, регистрацию и хранение в энергонезависимой памяти (карта микро-SD), а также экспорт во внешний компьютер через стандартные порты ввода/вывода.

Элементы МИИС показаны на рис. 2.



Рис. 2. Элементы МИИС: 1 – измерительный блок, 2 – блок электронного обеспечения, 3 – приемник СНС, 4 – антенна СНС, 5 – аккумулятор

Для пересчета вертикальной и горизонтальных компонент вектора магнитной индукции в систему координат носителя с использованием информации от модуля ИНС разработан специализированный комплекс программ «Вектор-ИНС». Он включает два основных элемента:

1. Ортогонализация компонент вектора магнитной индукции в системе координат датчика.
2. На основе данных ИНС выполняется поворот вектора магнитной индукции из системы координат датчика в систему координат носителя.

МОДЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Оценка работоспособности применяемых алгоритмов и обоснованности технических решений программно-аппаратного комплекса проводилась на модельном эксперименте в лабораторных условиях.

Для этого измерительный блок устанавливался на поверхность лабораторного стола (ось Y направлена по вертикали сверху вниз). Измерения выполнялись при трех положениях блока.

Изменения положения блока выполнялось последовательным поворотом вокруг оси Y векторного измерителя магнитной индукции на фиксированные углы $\pm 90^\circ$ (с погрешностью около 5°).

Общий вид измерительного блока (без кожуха) представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид измерительного блока (слева – модуль ИНС)

Во время эксперимента записывались первичная информация от модуля ИНС и компоненты вектора магнитной индукции. Информация от приемника СНС не использовалась.

На рисунке 4 показаны изменения величины компонент вектора индукции магнитного поля, измеренные в собственной системе координат измерителя и в лабораторной системе координат. Фиксация осей лабораторной системы произведена в начале эксперимента. Численные значения данных представлены в табл. 1.

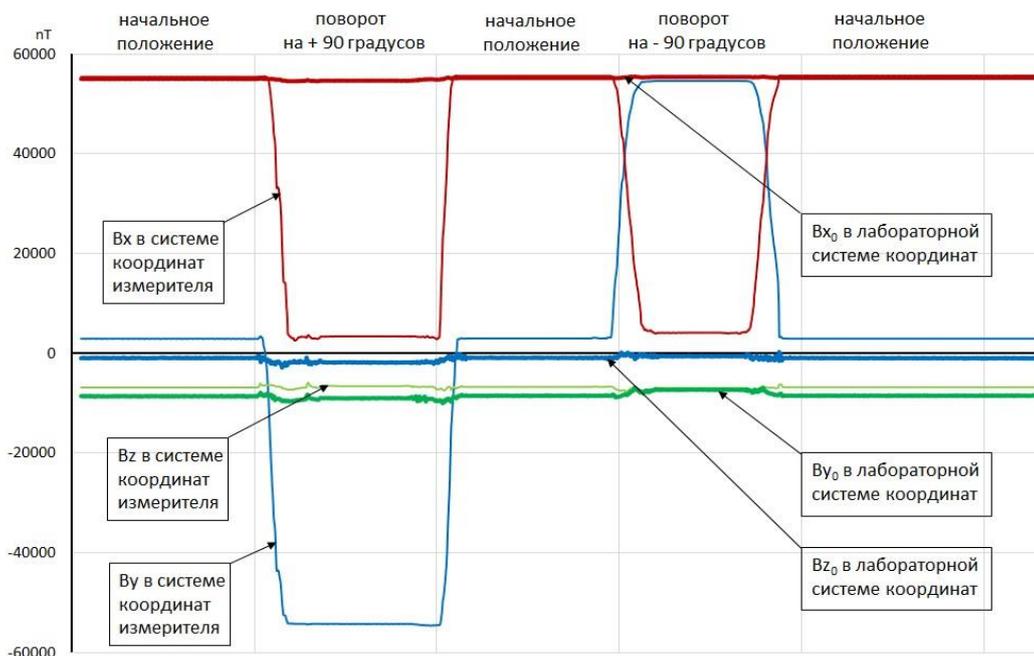


Рис. 4. Графики изменения величины компонент вектора индукции магнитного поля в зависимости от ориентации измерителя

Значения компонент вектора магнитной индукции

Компонента В, нТл	Начальное положение	Поворот +90°	Начальное положение	Поворот -90°	Начальное положение
В _y	4824,75	-54796,67	4903,82	55498,27	4871,66
В _{y0}	-933,22	-1756,48	-874,93	-537,07	-897,82
В _x	55165,04	5560,51	55340,73	1915,15	55382,18
В _{x0}	55058,06	54708,31	55241,38	55459,86	55298,81
В _z	-6284,49	-6499,14	-6792,74	-6792,74	-6744,97
В _{z0}	-8595,28	-8918,62	-8475,34	-7329,49	-8389,89
В	55731,09	55460,2	55897,06	55945,22	55941,17
В ₀	55732,75	55458,33	55894,61	55944,66	55938,85
В – В ₀	-1,66	1,87	2,45	0,56	2,32

На рисунке 4 зеленым цветом показаны изменения горизонтальной компоненты (Y), когда вокруг оси Y случайным образом колеблется датчик индукции. На измеренной и приведенной в систему координат носителя светло-зеленой развертке Y-компоненты видны ее небольшие относительные вариации (в пределах 3 %), свидетельствующие о погрешности пересчета в систему координат носителя. После обработки в программе «ВЕКТОР-Т» значения компоненты В_y смещаются примерно на 8 % от исходного значения. При этом относительные вариации уменьшаются примерно до 2 %. На рисунке 4 приведены изменения величины горизонтальной В_x (красный цвет) и вертикальной В_z (синий цвет) компонент индукции при вращении датчика индукции вокруг оси Y от 90 до 270°. В диапазонах 83–113° и 135–150° измеренные значения компоненты В_x резко уменьшаются. После обработки “провалы” исчезают, а значения компоненты практически перестают зависеть от угла поворота. Остается относительная вариация, не превышающая 3 %. В то же время измеренная компонента В_z ведет себя иначе. В первом диапазоне она резко уменьшается, а во втором диапазоне увеличивается примерно на ту же величину. После обработки компонента В_z также практически не зависит от угла поворота. Отметим, что после обработки относительные вариации не превышают 4 %, а общий уровень В_z понижается относительно исходного значения примерно на 9 %.

В таблице 2 приведены данные, позволяющие оценить эффективность предложенных решений.

Таблица 2

Изменение значений компонент вектора магнитной индукции

Компонента В, нТл	В (0°)	В (0°) – В (+90°)	В (+90°) – В (0°)	В (0°) – В (-90°)	В (-90°) – В (0°)	В (0°)
В _y	4824,75	59621,42	-59700,49	-50594,45	50626,61	4871,66
В _{y0}	-933,22	823,26	-881,55	-337,86	360,75	-897,82
В _x	55165,04	49604,53	-49780,22	53425,58	-53467,03	55382,18
В _{x0}	55058,06	349,75	-533,07	-218,48	161,05	55298,81
В _z	-6284,49	214,65	293,6	-588,29	540,52	-6744,97
В _{z0}	-8595,28	323,35	-443,28	-1145,84	1060,40	-8389,89

Из приведенных данных следуют основные выводы:

1. Наблюдается небольшое возрастание погрешности измерений в лабораторной системе координат – отклонение абсолютного значения модуля в диапазоне от $-1,66$ до $+2,45$ нТл, относительная погрешность не более $\pm 4 \times 10^{-5}$ (нарушение ортогональности $0,003^\circ$).

2. Изменение измеренных значений компонент вектора магнитной индукции в различных положениях (при условии, что угловое положение вектора магнитной индукции не изменяется) показывают следующие изменения углов в плоскостях X-Y (α), Y-Z (β), X-Z (γ), характеризующие угловые ошибки лабораторной системы координат в данном эксперименте (табл. 3).

Таблица 3

Угловые ошибки лабораторной системы координат

Угол, °	Начальное положение	Поворот +90°	Начальное положение	Поворот -90°	Начальное положение
α	0	-0,87	0,06	0,42	0,04
β	0	-4,95	0,30	2,01	0,09
γ	0	-0,39	0,15	1,34	0,25

Время работы комплекса программ «Вектор-ИНС», по сравнению с предыдущей версией, сокращено более чем в 100 раз.

ПОЛЕВЫЕ ДАННЫЕ

Результаты работы комплекса «ВЕКТОР-Т» при камеральной обработке полевых данных на объекте «Испытательная площадка» представлены на рис. 5. При выполнении полевых работ скорость движения БВС составляла 5 м/с (скорость ветра составляла от 2 до 5 м/с).

Высота измерителя над земной поверхностью изменялась в диапазоне от 0,5 до 1,5 м. Общее время съемки (при выполнении полетов по двойной ортогональной сетке маршрутов) составило 10 минут.

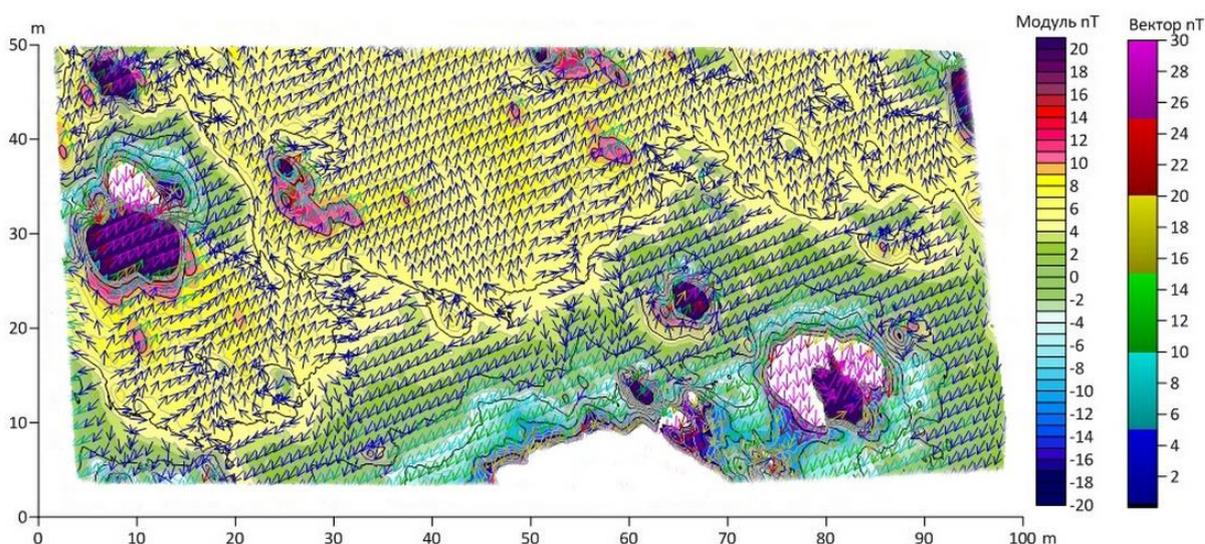


Рис. 5. Модуль и проекция вектора магнитной индукции на горизонтальную плоскость (средняя высота съемки 1.5 м)

Распределение модуля магнитной индукции отражает расположение магнитных масс и хорошо выделяет их контуры. В тоже время векторное поле позволяет увидеть более тонкую структуру среды, особенно на линиях резкой смены направления векторов, соответствующих изменениям вектора

остаточной намагниченности. Можно предполагать, что в этих местах магнитные свойства или остаточная намагниченность претерпевают скачок. В дальнейшем для демонстрации пространственного разрешения, амплитудного и векторного разрешений целесообразно провести съемку простейших тестовых объектов: металлическая или пластмассовая труба, или листы на поверхности, две трубы и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная бортовая многоканальная информационно-измерительная система со свободным закреплением магнитометра обеспечивает возможность измерения вектора магнитной индукции в процессе движения низколетящего воздушного судна. При этом многоканальная измерительная система записывает полетные характеристики и пространственные координаты не только судна, но и датчика индукции. По этим данным трехкомпонентные измерения индукции приводятся к системе координат судна. На примере практических измерений приведена карта модуля и горизонтальной проекции вектора магнитной индукции. По распределению модуля хорошо выделяются скопления магнитных масс, а по линиям резкой смены направления вектора – зоны изменения вектора остаточной намагниченности пород, слагающих исследуемый район.

ЛИТЕРАТУРА

- Савлук А.В., Злыгостев И.Н.** Программа выделения вертикальной и горизонтальной компонент вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ) "ВЕКТОР-Т": Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610472, заявка № 2018665035 от 24.12.2018, зарегистрировано 10.01.2019.
- Царьков Н.М.** Многоканальные радиолокационные измерители. – М.: Сов. радио, 1980. – 192 с.
- Ширман Я.Д.** Разрешение и сжатие сигналов. – М.: Сов. Радио, 1974. – 360 с.
- Еров М., Firsov A., Zligostev I., Savluk A., Weisman P.** Application of innovative high-frequency magnetometric probe (HFMP) on light UAVs geology, archeology and related fields // The World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium WMESS 2015 (Prague, Czech Republic, 7–11 September 2015): Abstract collection book. – Prague, 2015. – P. 369–369. – CD-ROM.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЗЛЫГОСТЕВ Игорь Николаевич – старший научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий ИНГГ СО РАН; руководитель модуля «Магнитометр» ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: разработка и создание автоматизированных информационно-измерительных систем геофизического и специального назначения.

ЭПОВ Михаил Иванович – д.т.н., академик РАН, главный научный сотрудник, ИНГГ СО РАН; научный руководитель ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: теория и моделирование электромагнитных полей в многомасштабных гетерогенных геологических средах, мониторинг верхних частей земной коры в целях экологии, инженерной геологии и археологии.

САВЛУК Андрей Васильевич – ведущий инженер лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: анализ и обработка многомерных сигналов, графических изображений, программирование.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, зав. лабораторией многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: численные методы, решение прямых и обратных задач электродинамики.