

Раздел III. Системы и средства связи, навигации и наведения

УДК 527.62.1

А.К. Волковицкий, Е.В. Каршаков, Б.В. Павлов, М.Ю. Тхоренко

МАГНИТОГРАДИЕНТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ

Описано применение измерений градиента магнитного поля для решения задач обнаружения подвижных и неподвижных целей. Дан обширный обзор литературы по применению как измерений непосредственно магнитного поля, так и его градиента в различных областях, таких как археология, геофизика, медицина, военное дело и т.д. На основании указанного обзора делается вывод о перспективности применения магнитоградиентных измерений для решения задач обнаружения целей. Рассмотрены модели и методы магнитоградиентных измерений; приведены оценки точности и чувствительности этих измерений с помощью существующей и перспективной аппаратуры. Подробно исследовано применение тензорного магнитного градиометра для решения задач обнаружения. В частности, предложен алгоритм определения положения уединенного магнитного диполя по тензору градиента создаваемого им магнитного поля. Для указанного алгоритма направление на диполь определяется неоднозначно и для устранения данной неоднозначности необходимо привлечение дополнительной информации. Отдельно рассмотрен вопрос применения тензорного обнаружителя на борту подвижного объекта. Показано, что при наличии нескольких градиентометров возможно как устранить неоднозначность, так и найти дипольный момент и расстояние до цели не привлекая дополнительной информации. Также в статье рассмотрено использование векторного магнитного градиометра для решения задач обнаружения. Как и в случае тензорного градиометра, исследуется проблема локализации уединенного магнитного диполя. Показано, что при использовании информации только о векторе градиента магнитного поля, задача определения положения диполя решается грубо, однако в решении отсутствует неоднозначность. В то же время, если известны также компоненты вектора индукции магнитного поля, то положение диполя можно определить точно. Кроме того, в статье обсуждаются вопросы выбора конкретного типа обнаружителя и особенности систем обнаружения, размещенных на неподвижных и подвижных объектах.

Магнитная градиентометрия; тензор градиента магнитного поля; вектор градиента магнитного поля; задачи обнаружения.

A.K. Volkovitsky, E.V. Karshakov, B.V. Pavlov, M.Yu. Tkhorenko

MAGNETIC GRADIOMETRY DATA IN THREAT DETECTION PROBLEMS

The paper presents an application of magnetic gradiometry in detection problems of stationary and moving targets. An extensive literature review on utilization of magnetic measurements in different fields, such as archeology, geophysics, medicine, military technologies etc. is given. Based on the literature review a conclusion is drawn on usefulness of magnetic field gradient measurements usage in detection problems. Consideration is given to models and methods of magnetic field gradient measurements; the accuracy of proposed measuring schemes is estimated based on performance data of existing and possible future sensors. Use of tensor magnetic gradiometry in target detection problems is investigated carefully. An algorithm to localize a dipole magnetic source is given. It was shown that the algorithm detects the sensor-dipole direction with an ambiguity necessitating use of additional data. An application of moving magnetic gradi-

ent tensor sensors is considered separately. It is shown that use of several gradiometers let eliminate any ambiguity in the problem and determine the distance to a magnetic dipole and its dipole moment. Use of vector magnetic gradiometry data in detection problems is considered too. As in an above mentioned case of tensor magnetic gradiometry a problem of localizing a magnetic dipole source using measurement of its magnetic field gradient vector is analyzed. It is shown that utilization of measurements of the magnetic gradient vector provides the sensor-dipole direction with considerable errors not introducing an ambiguity. At the same time, a dipole source can be localized accurately if one knows the magnetic field vector itself. Furthermore, the paper discusses a choice of a sensor type and properties of stationary and moving magnetic detectors.

Magnetic gradiometry; magnetic gradient tensor; magnetic gradient vector; threat detection problems.

Введение. Многие годы задача измерения градиента магнитного поля является актуальной для исследователей самых разных научных и технических направлений: от медицинской диагностики до поиска подводных лодок, от исследования свойств ионосферы до поиска археологических артефактов, от обнаружения оружия в аэропортах до исследования океанских волн и течений [1–8]. Возможности решения всех этих задач обусловлены особенностями самой измеряемой величины. Напряженность магнитного поля в сочетании с параметрами магнитного градиента несут информацию об источнике этого поля, его геометрическом положении и магнитных свойствах [9, 10]. По своей информативности результаты магнитоградиентных измерений существенно превосходят информацию, получаемую от классических магнитометров, измеряющих скалярное или векторное значение напряженности или индукции магнитного поля [11–13].

В связи с вышесказанным представляется перспективным рассмотреть возможности применения магнитоградиентных измерений для решения задач обнаружения и пеленгации магнитных объектов.

1. Структура моделей магнитоградиентных измерений. В основе функциональности той или иной магнитоградиентной измерительной системы лежит одно из двух возможных представлений измеряемого параметра [14]. Наиболее полным и классическим представлением градиента магнитного поля является тензорное значение производной векторного поля. Поскольку магнитное поле потенциально; т.е.:

$$B = -\nabla U^B,$$

где B – вектор магнитной индукции, то в системе координат $Oy_1y_2y_3$ градиент описывается матрицей вторых производных потенциала:

$$\nabla B = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_1^2} & \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_2 \partial y_1} & \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_3 \partial y_1} \\ \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_1 \partial y_2} & \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_2^2} & \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_3 \partial y_2} \\ \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_1 \partial y_3} & \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_2 \partial y_3} & \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_3^2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

При достаточной гладкости функции-потенциала матрица симметрична. Кроме того, потенциал является гармонической функцией, поэтому

$$\Delta U^B = \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_2^2} + \frac{\partial^2 U^B}{\partial y_3^2}. \quad (2)$$

Тем самым тензор градиента магнитного поля имеет только пять независимых компонент. Другой градиентной величиной, традиционно используемой [15], в частности, при геофизических исследованиях, является значение вектора градиента скалярной функции – модуля вектора магнитной индукции, для которого справедливо следующее выражение:

$$\nabla|B| = \nabla B \frac{B}{|B|}. \quad (3)$$

Оно получается при дифференцировании выражения $|B| = \sqrt{B^T B}$. Соответственно этим двум представлениям градиента магнитного поля различают два принципиально разных класса магнитогradientных измерительных систем – тензорные и векторные. Сегодня представители обоих этих классов так или иначе используются при решении различного рода исследовательских и инженерных задач [16–19].

Векторным магнитным градиентометром называют конструкцию, включающую несколько квантовых магнитометров, работающих в дифференциальном режиме при фиксированном известном разnose датчиков, который обычно составляет порядка 1-10 метров (рис. 1). Полагая расстояние между датчиками равным 1 м, компоненты вектора вычисляются следующим образом:

$$\nabla_1|B| = |B_1| - |B_b|, \nabla_2|B| = |B_2| - |B_b|, \nabla_3|B| = |B_3| - |B_b|. \quad (4)$$

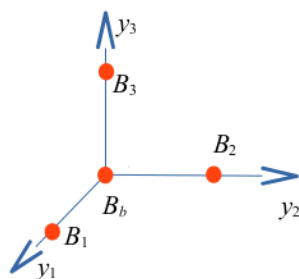


Рис. 1. Обобщенная схема векторного градиентометра

Чувствительность измерений определяется жесткостью базовой линии между датчиками и ее длиной. Погрешность же измерения компонент градиента зависит от условий калибровки.

Чтобы получить компоненты тензора градиента магнитного поля необходимо продифференцировать все компоненты вектора поля. Тогда тензорным магнитным градиентометром можно назвать конструкцию, включающую несколько векторных магнитометров, работающих в дифференциальном режиме при фиксированном известном разnose датчиков (рис. 2). Полагая расстояние между датчиками равным 1 м, компоненты тензора можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} \nabla_{11}^2 U^B &= B_{11} - B_{b1}, \nabla_{22}^2 U^B = B_{22} - B_{b2}, \\ \nabla_{33}^2 U^B &= -(\nabla_{22}^2 U^B + \nabla_{33}^2 U^B), \nabla_{12}^2 U^B = \nabla_{21}^2 U^B = B_{12} - B_{b2}, \\ \nabla_{13}^2 U^B &= \nabla_{31}^2 U^B = B_{13} - B_{b3}, \nabla_{23}^2 U^B = \nabla_{32}^2 U^B = B_{23} - B_{b3}. \end{aligned} \quad (5)$$

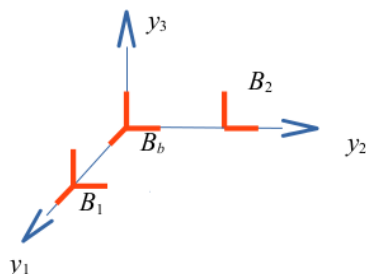


Рис. 2. Обобщенная схема тензорного градиентометра

Заметим, что компоненты вектора индукции магнитного поля, также как компоненты магнитного градиента и тензора магнитного поля, измеряются в осях, связанных с измерительным устройством. Для того, чтобы перепроектировать значения компонент данных величин в любую другую систему координат, необходимо учитывать ориентацию измерителя. По этой причине на подвижных объектах и тензорный, и векторный градиентометры необходимо снабжать системой определения ориентации.

Все упомянутые конструкции объединяет единый принцип — измерения производятся одновременно в нескольких пространственно разнесенных точках. Полученные результаты пересчитываются в параметры вектора или тензора с учетом геометрических параметров. При реализации данного принципа на практике возникают, по меньшей мере, две сложности. Во-первых, пространственно значительно протяженную конструкцию трудно сделать достаточно жесткой, чтобы положение датчиков можно было считать неизменным. Особенно сложно добиться геометрической стабильности для конструкций, монтируемых на фюзеляже летательных аппаратов и буксируемых систем, а во-вторых, магниточувствительные датчики всегда отличаются друг от друга систематическими ошибками, параметрами температурного дрейфа и т.п. С учетом малости измеряемых величин влияние этих ошибок является весьма существенным. Значительное число экспериментальных работ показало, что после выполнения необходимых калибровок чувствительность такого векторного градиентометра может быть доведена до уровня порядка 1 пТл/м в полосе 1 Гц.

2. Обнаружение с использованием тензорного магнитогradientометра.

В задачах обнаружения требуется определить положение того или иного объекта, который является источником магнитного поля. При удалении от источника на расстояние, существенно превосходящее его размеры, поле этого источника не отличимо от поля точечного диполя. Это справедливо и для витка с током [20], и для более сложных объектов. В том случае, когда задача обнаружения решена – в сигнале выделена аномальная составляющая, обусловленная источником, – можно свести задачу определения координат объекта к обратной задаче, когда по измерениям параметров магнитного поля требуется определить параметры точечного диполя.

Точечный магнитный диполь характеризуется двумя векторами: радиусом-вектором точки расположения диполя и вектором дипольного момента – всего шесть параметров. Можно предположить, что, измерив шесть независимых параметров, можно определить параметры диполя, создающего эквивалентное измеренному магнитное поле.

Как следствие, измерение только параметров тензора градиента не позволяет полностью определить параметры диполя – необходимо измерение еще одного параметра.

Тем не менее, измерение тензора градиента может помочь при решении задачи пеленгации. Компоненты тензора в прямоугольной системе координат могут быть рассчитаны через потенциал поля точечного диполя [20]:

$$U^B = \frac{\mu\mu_0(r^T M)}{4\pi(r^T r)^{\frac{3}{2}}}, \quad (6)$$

Здесь M – вектор дипольного момента, r – радиус вектор точки измерения, μ – магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Если выбрать систему координат, показанную на рис. 3, то дифференцируя по трем направлениям можно получить вектор поля

$$-\nabla U^B = \frac{\mu\mu_0|M|}{4\pi|r|^5} \begin{pmatrix} 3y_1^2 - |r|^2 \\ 3y_1y_2 \\ 3y_1y_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

и его тензор

$$-\nabla\nabla U^B = \frac{3\mu\mu_0|M|}{4\pi|r|^7} \times \begin{pmatrix} -2y_1^3 + 3y_1y_2^2 + 3y_1y_3^2 & -4y_1^2y_2 + y_2^3 + y_2y_3^2 & -4y_1^2y_3 + y_3^3 + y_3y_2^2 \\ -4y_1^2y_2 + y_2^3 + y_2y_3^2 & y_1^3 - 4y_1y_2^2 + y_1y_3^2 & -5y_1y_2y_3 \\ -4y_1^2y_3 + y_3^3 + y_3y_2^2 & -5y_1y_2y_3 & y_1^3 - 4y_1y_3^2 + y_1y_2^2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

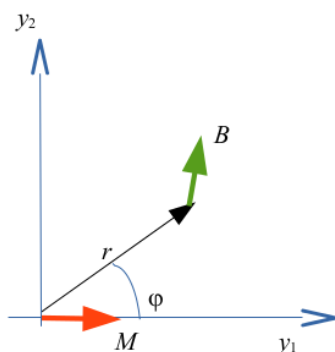


Рис. 3. Система координат, связанная с диполем

Измеренный тензор (8) может быть приведен к главным осям, в которых отличны от нуля только диагональные элементы. На рис. 4 показано, как отклоняется направление одной из главных осей от радиус-вектора точки измерений (угол \$\alpha\$). На рис. 5 показано, как угол \$\alpha\$ определен.

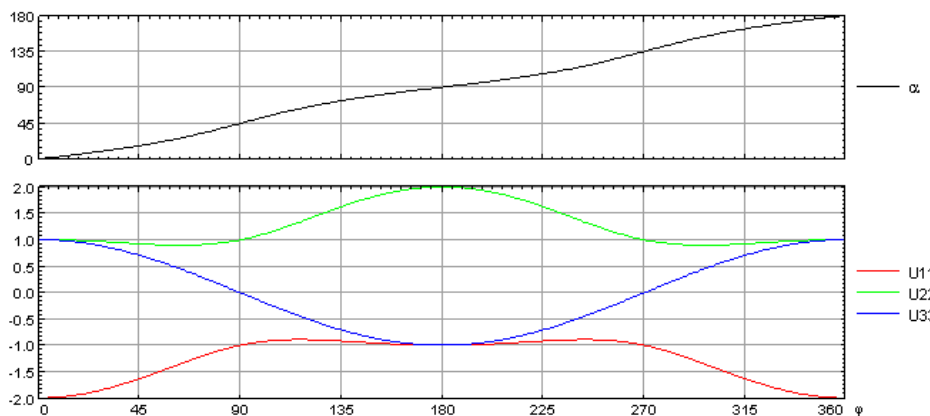


Рис. 4. Параметры тензора градиента магнитного поля

Видно, что зная угол \$\phi\$ направления радиус-вектора относительно диполя можно определить \$\alpha\$. Поскольку тензор остается неизменным при повороте вокруг оси \$y_3\$ на \$180^\circ\$, угол определяется с точностью до \$180^\circ\$. Сам же угол \$\phi\$ определяется из соотношения главных компонент тензора, показанных на рис. 4. Их значения поделены на величину \$3\mu\mu_0|M|/4\pi|r|^4\$.

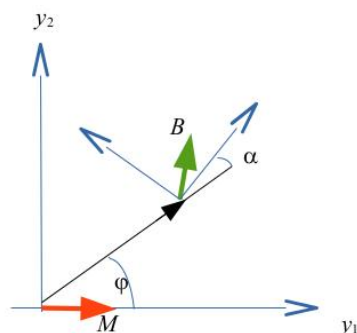


Рис. 5. Главные оси тензора в точке измерения

В интервале от 0° до 90° по φ компонента U_{11} , отвечающая двойной производной по первой компоненте, максимальна по амплитуде и отрицательна. Задав соответствующим образом направление первой оси, необходимо так выбрать направление третьей оси, чтобы ей соответствовала минимальная амплитуда градиента. Направление второй оси должно задавать правую тройку.

В интервале от 90° до 180° по φ компонента U_{22} , отвечающая двойной производной по второй компоненте, максимальна по амплитуде и положительна. Задав соответствующим образом направление второй оси, необходимо так выбрать направление третьей оси, чтобы ей соответствовала минимальная амплитуда градиента. Направление первой оси должно задавать правую тройку.

В интервале от 360° до 180° по φ компоненты тензора ведут себя также, как и при φ в интервале от 0 до 180° . Т.е. угол φ можно определить лишь с точностью до знака. При этом если для φ от 0° до 180° определяется угол α , то для φ от 360° до 180° это угол $-\alpha$.

Таким образом, компоненты тензора градиента определяют направление на два одинаковых по величине и противоположных по направлению диаметрально расположенных диполя M и M' , которые могли бы создать измеренный градиент, в силу нечувствительности к повороту на 180° , и еще два диполя M'' и M''' в силу симметрии относительно оси диполя (рис. 6).

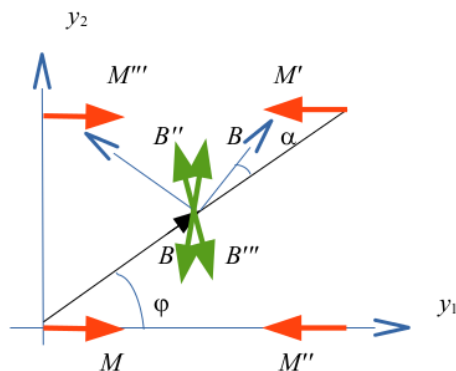


Рис. 6. Неопределенность при пеленгации диполя по измерениям тензора градиента магнитного поля

Т. е. задача обнаружения при измерении тензора градиента решается в том случае, если поиск ведется только в одной из четвертей. Из рис. 6 вполне очевидно, что дополнительная информация о направляющих косинусах вектора поля по-

зволит сразу же отбросить неверные гипотезы, а при измерении величины поля, согласно формулам (7), (8), определить расстояние до диполя и величину его магнитного момента. Также очевидно, что измерение модуля магнитного поля позволит вычислить расстояние и магнитный момент, но для выделения истинного направления его недостаточно – необходима дополнительная информация.

Дополнительной информацией для выделения правильной гипотезы могут являться последовательные измерения вдоль траектории. Если выполняется поиск неподвижного или малоподвижного источника с борта быстро движущегося аппарата, два из четырех диполей будут двигаться со скоростью, вдвое большей скорости обнаружителя. Также можно использовать показания нескольких разнесенных градиентометров. Поскольку осями симметрии эквивалентных решений являются линии, проведенные через точку измерений параллельно и перпендикулярно оси диполя, то уже для трех не лежащих на одной прямой градиентометров результатом пеленгации будет одна точка (рис. 7). Отметим, что такая система не требует измерения поля, т.е. такая система позволяет не только избавиться от неоднозначности, но и локализовать объект, определив при этом дипольный момент источника.

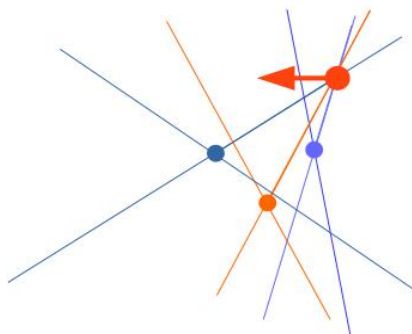


Рис. 7. Пеленгация диполя тремя градиентометрами

3. Обнаружение с использованием векторного магнитоградиентометра.

Пусть для измерения доступны компоненты вектора градиента модуля (рис. 8). Этот вектор направлен преимущественно в сторону диполя. Отклонение от направления на диполь в зависимости от угла α показано на рис. 9. Т.е. задача пеленгации в этом случае решается грубо, однако нет неоднозначности, как это было в случае с тензором.

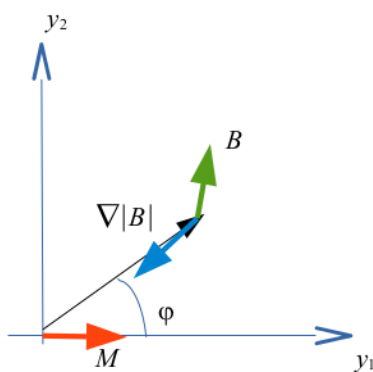


Рис. 8. Измерение поля и вектора градиента

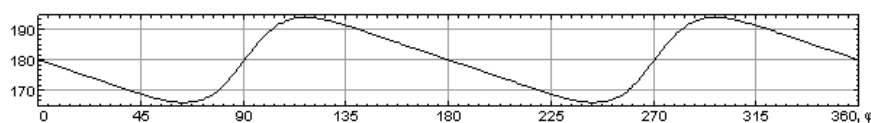


Рис. 9. Изменение угла между радиус-вектором и вектором градиента

Если измерить также направляющие косинусы самого вектора поля, задача обнаружения решается точно. Зависимость угла между векторами градиента и поля от φ является взаимнооднозначным соответствием и показана на рис. 10. Если известен модуль поля, из (7), (8) с учетом (3) можно определить расстояние до диполя и его магнитный момент.

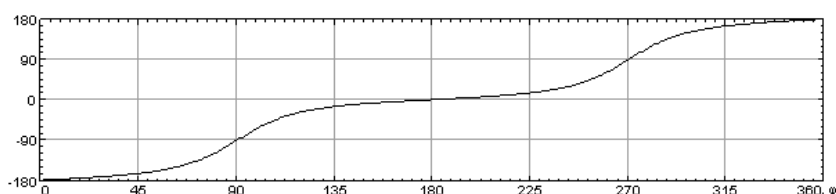


Рис. 10. Изменение угла между вектором градиента и вектором поля

Заключение. На основе приведенных материалов можно сделать вывод о перспективности применения магнитоградиентметрических систем при решении задач обнаружения. Выбор того или иного способа измерения градиента при решении задач обнаружения должен определяться конкретными условиями применения. В соответствии с различными условиями функционирования и военно-тактического назначения магнитоградиентные измерения могут использоваться в неподвижных системах магнитного обнаружения и в системах магнитного обнаружения, устанавливаемых на подвижных объектах. Чувствительность стационарных магнитоградиентных систем обнаружения в основном определяется чувствительностью используемых в них датчиков. Чувствительность магнитоградиентных систем, устанавливаемых на подвижных объектах, определяется пространственными размерами системы и особенностями компенсации магнитных помех, обусловленных движением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Foley C.P. et al.* Geophysical Exploration Using Magnetic Gradiometry Based on HTS SQUIDS // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Vol. 11, issue 1. – P. 1375-1378.
2. *Gallop J.C.* SQUIDS and their applications // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1999. – Vol. 9. – P. 417-429.
3. *Zou N., Nehorai A.* Detection of Ship Wakes Using an Airborne Magnetic Transducer // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. – 2000. – Vol. 38, No. 1. – P. 512-539
4. *William E.D. et al* Performance Metrics for State-of-the-Art Airborne Magnetic and Electromagnetic Systems for Mapping and Detection of Unexploded Ordnance. – 2010.
5. *Xiaoming Z., Yan Z.* Analysis of Key Technologies in Geomagnetic Navigation // 7th International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Measurement Theory and Systems and Aeronautical Equipment. – 2008. – Vol. 7128. – P. (71282J-1)-(71282J-6).
6. *Пешихонов В.Г.* Навигационные системы // Вестник Российской академии наук. – 1997. – Т. 67, № 1. – С. 43-52.
7. *Малеев П.И. и др.* Состояние развития и перспективы использования морской магнитоградиентметрической системы // Навигация и гидрография. – 2006. – № 23. – С. 91-96.

8. Волковицкий А.К. и др. Измерения физических полей на борту летательного аппарата при решении навигационных задач // XXIX Конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электронприбор», 2014. – С. 232-241.
9. Wynn M. Magnetic Dipole Localization with a Total-Field Vector Gradiometer // MARELEC 2004. – 2004.
10. Tkhorenko M.Yu. et al. Algorithm to Position an Object Moving in the Low-Frequency Electromagnetic Field // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, No. 11. – P. 2033-2044.
11. Волковицкий А.К. и др. О возможности использования магнитоградиентных измерений на борту летательного аппарата // Материалы конференции «Управление в технических системах» (УТС-2010). – 2010. – С. 395-398.
12. Вовенко Т.А. и др. Модели и структура бортовых измерений пространственных физических полей // Проблемы управления. – 2015. – № 3. – С. 59-68.
13. Каршаков Е.В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 35. – С. 265-282.
14. Каршаков Е.В. и др. Магнитная градиентометрия и ее навигационное применение // Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. 1. – С. 345-355.
15. Noriega G. Performance measures in aeromagnetic compensation // Leading Edge. – 2011. – Vol. 30, no. 10. – P. 1122-1127.
16. Camara E., Guimaraes S. Magnetic Airborne Survey - Geophysical Flight // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss. – 2016.
17. Noriega G. Aeromagnetic Compensation in Gradiometry—Performance, Model Stability, and Robustness // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2015. – Vol. 12, no. 1. – P. 117-121.
18. Wiegert R., Oeshger J. Portable Magnetic Gradiometer for Real-Time Localization and Classification of Unexploded Ordnance // OCEANS 2006 – 2006.
19. FitzGerald D. et al. Full Tensor Magnetic Gradiometry Processing and Interpretation Developments // 11th SGA Biennial Technical Meeting and Exhibition – 2009.
20. Purcell E. Electricity and Magnetism. – 3rd Edition. – Cambridge University Press, 2013. – 853 p.

REFERENCES

1. Foley C.P. et al. Geophysical Exploration Using Magnetic Gradiometry Based on HTS SQUIDS, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, Vol. 11, issue 1, pp. 1375-1378.
2. Gallop J.C. SQUIDS and their applications, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1999, Vol. 9, pp. 417-429.
3. Zou N., Nehorai A. Detection of Ship Wakes Using an Airborne Magnetic Transducer, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 1, pp. 512-539
4. William E.D. et al Performance Metrics for State-of-the-Art Airborne Magnetic and Electromagnetic Systems for Mapping and Detection of Unexploded Ordnance. 2010.
5. Xiaoming Z., Yan Z. Analysis of Key Technologies in Geomagnetic Navigation, *7th International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Measurement Theory and Systems and Aeronautical Equipment*, 2008, Vol. 7128, pp. (71282J-1)-(71282J-6).
6. Peshekhonov V.G. Navigatsionnye sistemy [Navigation system], *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 1997, Vol. 67, No. 1, pp. 43-52.
7. Maleev P.I. i dr. Sostoyanie razvitiya i perspektivy ispol'zovaniya morskoy magnitometricheskoy sistemy [Current state and perspectives of a naval magnetic system], *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and Hydrography], 2006, No. 23, pp. 91-96.
8. Volkovitskiy A.K. i dr. Izmereniya fizicheskikh poley na bortu letatel'nogo apparata pri reshenii navigatsionnykh zadach [Airborne physical fields measurements as navigational aids], *XXIX Konferentsii pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* [XXIX Ostryakov's memorial conference]. St. Petersburg: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электронприбор», 2014, pp. 232-241.
9. Wynn M. Magnetic Dipole Localization with a Total-Field Vector Gradiometer, *MARELEC 2004*.
10. Tkhorenko M.Yu. et al. Algorithm to Position an Object Moving in the Low-Frequency Electromagnetic Field, *Automation and Remote Control*, 2015, Vol. 76, No. 11, pp. 2033-2044.

11. Volkovitskiy A.K. i dr. O vozmozhnosti ispol'zovaniya magnitogradientnykh izmereniy na bortu letatel'nogo apparata [On Possibility of Airborne Magnetic Gradiometry Data Usage], *Materialy konferentsii «Upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh» (UTS-2010)* [Control in Technical Systems – 2010], 2010, pp. 395-398.
12. Vovenko T.A. i dr. Modeli i struktura bortovykh izmereniy prostranstvennykh fizicheskikh poley [Models and Structure of Airborne Devices to Measure Spatial Physical Fields], *Problemy upravleniya* [Control Problems], 2015, No. 3, pp. 59-68.
13. Karshakov E.V. Primenenie izmereniy parametrov gradienta magnitnogo polya Zemli v zadache navigatsii letatel'nogo apparata [Application of Magnetic Gradiometry Data in Aircraft Navigation], *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Control in large systems], 2011, Issue 35, pp. 265-282.
14. Karshakov E.V. i dr. Magnitnaya gradientometriya i ee navigatsionnoe primeneniye [Magnetic Gradiometry and Its Navigational Applications], *Materialy 10-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the 10th all-Russian scientific-practical conference "Advanced systems and control problems"], 2015, Vol. 1, pp. 345-355.
15. Noriega G. Performance measures in aeromagnetic compensation, *Leading Edge*, 2011, Vol. 30, No. 10, pp. 1122-1127.
16. Camara E., Guimaraes S. Magnetic Airborne Survey - Geophysical Flight, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss.* 2016.
17. Noriega G. Aeromagnetic Compensation in Gradiometry—Performance, Model Stability, and Robustness, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 117-121.
18. Wiegert R., Oeshger J. Portable Magnetic Gradiometer for Real-Time Localization and Classification of Unexploded Ordnance, *OCEANS 2006*.
19. FitzGerald D. et al. Full Tensor Magnetic Gradiometry Processing and Interpretation Developments, *11th SGA Biennial Technical Meeting and Exhibition – 2009*.
20. Purcell E. Electricity and Magnetism. 3rd Edition. Cambridge University Press, 2013, 853 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Афанасьев.

Волковицкий Андрей Кириллович – Институт проблем управления РАН; e-mail: avolkovitsky@gmail.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: 84953349080; к.т.н.; старший научный сотрудник.

Каршаков Евгений Владимирович – e-mail: karshak@mail.ru; к.ф.-м.н.; старший научный сотрудник.

Павлов Борис Викторович – e-mail: pavlov@ipu.ru; д.т.н.; главный научный сотрудник

Тхоренко Максим Юрьевич – e-mail: tkhorenkom@mail.ru; старший инженер

Volkovitsky Andrey Kirillovich – Institute of Control Sciences, RAS; e-mail: avolkovitsky@gmail.ru; 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia; phone: +74953349080; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Karshakov Evgeniy Vladimirovich – e-mail: karshak@mail.ru; cand. of phis.-math. sc.; senior researcher.

Pavlov Boris Viktorovich – e-mail: pavlov@ipu.ru; dr. of eng. sc.; chief researcher.

Tkhorenko Maxim Yurievich – e-mail: tkorenkom@ipu.ru; senior engineer.