



УДК 621.317.4  
ГРНТИ 37.15.31

## ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВОЗДУШНОЙ НАВИГАЦИИ

*И.М. ГОЛЕВ, доктор физико-математических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Е.А. НИКИТИНА, кандидат физико-математических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Представлен анализ составляющих реального магнитного поля Земли. Показана зависимость пространственной разрешающей способности от чувствительности магнетометра при навигации по магнитному полю Земли. Рассмотрены основные характеристики и особенности магнитометров, используемых для решения задачи навигации летательного аппарата.

*Ключевые слова:* магнитное поле Земли; навигация; магнитометр; летательный аппарат; СКВИД; градиентометрический датчик.

### SOME DETAILS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD MEASURING FOR THE TASK OF AIR NAVIGATION

*I.M. GOLEV, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor  
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
E.A. NIKITINA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The analysis of the Earth's magnetic field components is presented. The dependence of the spatial resolution and the accuracy of navigation from the magnetometers sensitivity were demonstrated. Main characteristics and parameters of magnetometers for the navigation task are considered.

*Keywords:* Earth's magnetic field; navigation; magnetometer; aircraft; SQUID; gradiometer.

В настоящее время активно прорабатываются задачи навигации и/или наведения летательных аппаратов с использованием информации о параметрах геофизических полей, в частности, гравитационного и магнитного полей Земли (МПЗ).

Системы навигации, в которых используется связь параметров геофизических полей с географическими координатами объекта, обладают высокими автономностью и помехозащищенностью и, по сути, являются единственной альтернативой спутниковым навигационным системам [2, 3].

В настоящей работе рассмотрены некоторые технические аспекты измерения магнитного поля Земли, связанные с решением задачи воздушной навигации.

Известно, что наблюдаемое МПЗ является суммой нескольких составляющих:

- главное геомагнитное поле, создаваемое ядром Земли;
- поле локальных аномалий, определяемое особенностями структуры земной коры;



- поле магнитосферы, зависящее от внешних по отношению к объему Земли источников.

Среднее значение модуля напряженности главного магнитного поля составляет  $5 \cdot 10^4$  нТл, тогда как напряженность внешнего поля, определяемая электрическими токами в ионосфере, существенно меньше (примерно 20 нТл). Локальные магнитные аномалии могут быть сравнительно большими. Например, для Курской магнитной аномалии величина магнитной индукции более  $2 \cdot 10^4$  нТл [1, 5].

Для решения задач ориентации и навигации измеряются следующие величины [1, 5]:

- компоненты вектора индукции МПЗ: северная, восточная и вертикальная составляющие;

- модуль вектора индукции МПЗ;

- компоненты градиента вектора индукции МПЗ.

Следует отметить, что последний пункт, а именно измерения градиента МПЗ, позволяет существенно уточнить решение навигационной задачи [6]. Во-первых, изменения градиента обусловлены, главным образом, локальными особенностями среды и, как следствие, они в меньшей степени подвержены изменениям с течением времени, поэтому становится возможным выделить соответствие между этим параметром и координатами объекта. Во-вторых, измерение градиента на относительно короткой базе позволяет пренебречь вариационной составляющей магнитного поля, чего нельзя сделать при измерениях самого поля. В-третьих, аномальное поле градиента имеет меньший радиус корреляции (десятки метров), поскольку влияние оказывают в первую очередь приповерхностные объекты, которые вносят более контрастные аномалии. Относительно высокая стабильность градиента магнитной индукции позволяет получить карты таких полей на десятилетия.

Вместе с этим, точность решения навигационной задачи определяется целым набором факторов, среди которых наиболее важными являются амплитуда аномалий и радиус корреляции градиентного поля, которые зависят от высоты полета и геологических особенностей местности [6]. Кроме того, суммарная погрешность определения местоположения зависит от точности измерения градиента МПЗ и длины интервала коррекции. Например, в результате моделирования работы алгоритма комплексирования магнитоградиентной корреляционно-экстремальной и инерциальной навигационных систем, для начальной позиционной ошибки, составляющей несколько радиусов корреляции поля градиента, к концу участка коррекции удается получить ошибку определения координат, соизмеримую с радиусом корреляции. При этом протяженность участка коррекции превышает радиус корреляции в сотни раз. С уменьшением радиуса корреляции в два раза, которое может быть достигнуто, как правило, снижением высоты полета, точность решения также повышается в два раза [6].

Уменьшение амплитуды аномалий и изменение радиуса корреляции поля градиента с высотой приводит к увеличению требований к чувствительности и динамическому диапазону магнитных датчиков. В [7] с помощью программы World Magnetic Model, встроенной в систему вычислений Matlab, для случая главного МПЗ были проведены расчеты требуемой чувствительности по измерению магнитного поля для определения смещения в пространстве. На рисунке 1 показано, что при смещении на 10 м магнитное поле изменяется на величину порядка 0,002 нТл. В случае смещения в пространстве вдоль экватора на 100 м – 0,005 нТл (кривая 1). При движении вдоль параллели 23 град. 27 мин. юж. широты (Tropic of Capricorn) (кривая 2) и сев. широты (Tropic of Cancer) (кривая 3) для такого смещения чувствительность магнитометра должна быть не менее 0,01 нТл.



Непрогнозируемый фактор, который необходимо учитывать при измерениях параметров МПЗ – это вариации геомагнитного поля. Причинами их возникновения могут быть: солнечный ветер, процессы в магнитосфере и ионосфере. Классификация вариаций осуществляется по скорости их изменения во времени и интенсивности. *Короткопериодные вариации* с периодом от 0,2 с до 30 мин. имеют амплитуду от 0,5 до 10 нТл. Магнитные вариации с периодом в одни сутки *называются суточными*, их амплитуда в разные дни и годы изменяется в широких пределах – от 10 до 60 нТл. А периодические вариации высокой частоты и интенсивности, достигающей нескольких тысяч нанотесла, называются *магнитными бурями*, их интенсивность и продолжительность (до 2-х сут.) связывают с солнечной активностью [1].

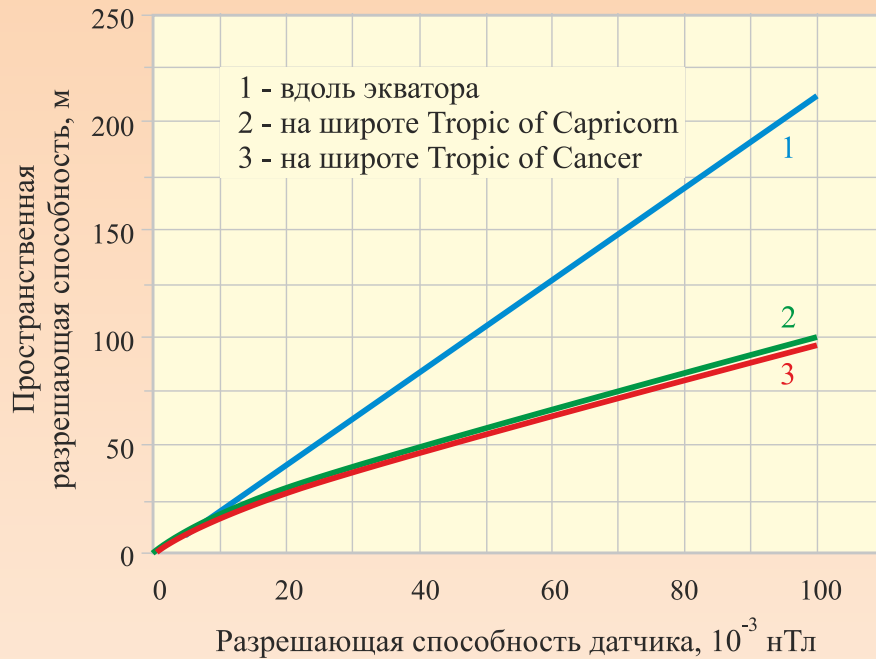


Рисунок 1 – Зависимость пространственной разрешающей способности от чувствительности магнетометра

Еще одним фактором, оказывающим влияние на измерения МПЗ, является наличие помех, создаваемых летательным аппаратом (ЛА) – собственным полем конструктивных элементов, изменяющихся в зависимости от характера механического движения.

Можно выделить следующие составляющие магнитного поля ЛА:

- магнитное поле, обусловленное намагниченностью конструктивных элементов, в том числе и под действием поля Земли;
- собственное магнитное поле электротехнических и радиотехнических устройств;
- магнитное поле транспортных токов в силовых кабелях;
- вихревое магнитное поле при движении ЛА в поле Земли.

Результаты экспериментальных исследований собственного магнитного поля типового беспилотного ЛА [8] показывают, что электродвигатели и сервоприводы создают поля до 400 нТл, металлические конструктивные элементы – до 50 нТл.

Характерные значения измеряемых магнитных полей и помех представлены в таблице 1.



Таблица 1 – Измеряемые значения МПЗ

Составляющие МПЗ	Величина, нТл
Главное магнитное поле	$5 \cdot 10^4$
Поля от электрических токов в ионосфере, примерно	20
Магнитные вариации	до 60
Магнитные бури	до $10^3$
Электродвигатели ЛА	до 400
Металлические конструктивные элементы ЛА	до 50

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики магнитометров различных типов, выпускаемых на коммерческой основе, которые применяются или могут быть применены в современных навигационных системах ЛА в соответствии с требованиями к магнитометрам, сформулированным выше.

По параметрам чувствительности можно выделить классические (феррозондовые, магниторезистивные, на эффекте Холла, магнитоэлектрические) и квантовые магнитометры [10-13]. Рекордной чувствительностью в настоящее время обладают СКВИДы (сверхпроводящий квантовый интерферометрический датчик, Superconducting Quantum Interference Device) – эти датчики обладают энергетической чувствительностью менее  $5 \cdot 10^{-33}$  Дж/Гц (примерно  $10h$ , где  $h$  – постоянная Планка) и чувствительностью по магнитному полю –  $10^{-4}$  нТл [14-16].

Таблица 2 – Характеристики магнетометров

Физический принцип действия	Чувствительность, нТл	Рабочий диапазон частот	Динамический диапазон, дБ	Примечание
Ядерный магнитный резонанс	$10^{-2}$	0÷0,2	120	Большие размеры, чувствительность к механическим воздействиям, нет оси чувствительности
Магнитный резонанс с оптической накачкой	$10^{-3}$	0÷20	100	
Феррозондовый	$10^{-2}$	0÷50	70	Широкий диапазон температур, возможность применения интегральных технологий
Магниторезистивный	$10^{-2}$	0÷5000	90	
Холловский	$10^2$	0÷200	120	Возможность применения интегральных технологий
Магнито-электрический	$10^1 \div 10^2$	0,02÷200	–	
СКВИД-магнитометр на постоянном токе	$10^{-4}$	0÷5	140	Возможность применения интегральных технологий и трансформаторов по постоянному току, сложное криогенное оборудование

СКВИДЫ на низкотемпературных сверхпроводниках, обладающие рекордной чувствительностью, предполагают наличие криогенных систем, позволяющих обеспечить работу датчиков при температуре жидкого гелия (минус 269 °С). Эти датчики имеют высокую долговременную стабильность, малый уровень шумов, позволяют использовать трансформаторы магнитного потока по постоянному току для построения градиентометрических датчиков и сверхпроводящие экраны с коэффициентом экранирования магнитных полей более  $10^5$ . Для СКВИДов, построенных на высокотемпературных сверхпроводниках, действующих при температуре жидкого азота (минус 196 °С), необходимо менее сложное криогенное оборудование, однако, этот тип СКВИДов на данный момент обладает низкой стабильностью, его параметры ухудшаются в процессе эксплуатации.



Квантовые магнетометры, основанные на эффектах Зеемана и Оверхаузенра, имеют высокую чувствительность ( $10^{-3}$  нТл) и позволяют измерить модуль индукции магнитного поля. К их недостаткам следует отнести низкое быстродействие и малый динамический диапазон [17].

Классические приборы имеют существенно меньшие чувствительности, но обладают малыми размерами и низкой себестоимостью, кроме того, могут быть изготовлены по интегральной технологии.

Особенности геомагнитного поля Земли, в частности, его вариационные составляющие, а также наличие магнитных помех, создаваемых самим ЛА, свидетельствуют о том, что высокие требования должны предъявляться не только к такому параметру как чувствительность. Определяющими могут оказаться, например, долговременная стабильность, динамический диапазон, линейность и быстродействие. В свою очередь, геометрические и летно-технические характеристики ЛА могут накладывать ограничения на массогабаритные и энергетические параметры магнетометров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Явлонский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд. ЛГУ, 1978. 592 с.
2. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве / Л.И. Августов, А.В. Бабиченко, М.И. Орехов и др. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2015. 592 с.
3. Grewal M.S., Andrews A.P., Bartone C.G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration // Wiley. 2013. 602 с.
4. Серкерев С.А. Гравиразведка и магниторазведка. М.: ОАО «Издательство «Недра», 1999. 437 с.
5. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
6. Каршаков Е.В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление подвижными объектами и навигация: изд. РАН. 2011. Вып. 35. С. 265–283.
7. Sharma G., Laureyns I.A.G., Ariyur K.B. The Use of Natural Signals for Localization and Navigation with Application to Centimeter sized UAVs // Proceedings of the 2010 American Control Conference. 2010. P. 27–32.
8. Изучение магнитного поля беспилотного летательного аппарата с целью создания аппаратного комплекса для аэромагнитной съемки / А.Ю. Палёнов, Л.А. Золотая, М.В. Коснырева и др. // Инженерная, угольная и рудная геофизика. Современное состояние и перспективы развития: мат. междунар. научно–практ. конф. и выст. ЕАГО. 2015. С. 175–177.
9. Феррозондовый магнитометр для измерения магнитной индукции до 1 нТл / П.Ф. Баранов, С.В. Муравьев, В.Е. Огай и др. // Известия Томского политехнического университета. Серия «Энергетика». 2012. Т. 320. № 4. С. 89–92.
10. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. М.: ДМК Пресс, 2001. Т. 1. 544 с.
11. Magnetoelectric Sensor of Magnetic Field / M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov et al. // Ferroelectrics. 2002. Vol. 280. P. 199–202.
12. Ta Z., Wei Ch. Yu, Jian Z.Z., Fu Ch. Du. Research on Three-Component Geomagnetic Field Differential Measurement Method for Underwater Vehicle // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 165–176.



13. Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F. Sample 3D magnetometer for a dilution refrigerator // *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Vol. 400. P. 052037 (4 p.).
14. Жернаков О.А., Фрезинский В.С. Криогенные чувствительные элементы инерциальных навигационных систем. Изд. Центральный НИИ «Румб», 1988. 204 с.
15. Белодедов М.В., Горбачев В.В., Ичкитидзе Л.П. Применение высокотемпературных сверхпроводящих материалов: новые возможности // *Вестник РАЕН*. 2008. Т. 8. № 1. С. 12–16.
16. Can H., Topal U. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2015. Vol. 28. No. 3. P. 1093–1096.
17. Александров Е.Б. Прогресс в квантовой магнитометрии для геомагнитных исследований // *УФН*. 2010. Т. 180. № 5. С. 509–519.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Yablonsky B.M. The magnetism of the Earth. L.: Publishing LSU, 1978. 592 p.
2. Navigation of aircraft in near-Earth space / L.I. Avgustov, A.V. Babichev, M.I. Orehov et al. M.: Nauchtehlitnzdat, 2015. 592 p.
3. Grewal M.S., Andrews A.P., Bartone C.G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration // Wiley. 2013. 602 с.
4. Serkerov M.A. Gravity and magnetic survey. M.: Nedra, 1999. 437 p.
5. Beloglazov I.N., Dzhandzhgava G.I., Chigin G.P. The basis of navigation in geophysical fields. M.: Science, 1985. 328 p.
6. Karshakov E.V. An application of the Earth's magnetic field gradient measuring in the task of aircraft's navigation // *Publ. RAS*. 2011. Vol. 35. P. 265–283.
7. Sharma G., Laureyns I.A.G., Ariyur K.B. The Use of Natural Signals for Localization and Navigation with Application to Centimeter sized UAVs // *Proceedings of the 2010 American Control Conference*. 2010. P. 27–32.
8. The research of the magnetic field of a pilotless aircraft fo creation a hardware system for aeromagnetic survey / A.Ju. Pal'onov, L.A. Zolotaya, M.V. Kosnyreva et al. // *Engineering, coal and mining geophysics. Current state and prospects of development: proceedings of the international scientific-practical conference and exhibition EAGO*. 2015. P. 175–177.
9. Flux-gate magnetometer to measure the magnetic induction to 1 nT / P.F. Baranov., S.V. Murav'ev, V.E. Ogay et al. // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Series «Energy»*. 2012. Vol. 320 No. 4. P. 89–92.
10. Baranochnikov M.L. Micromagneto-electronic. M.: DMK Press, 2001. Vol. 1. 544 p.
11. Magnetolectric Sensor of Magnetic Field / M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov et al. // *Ferroelectrics*. 2002. Vol. 280. P. 199–202
12. Ta Z., Wei Ch. Yu, Jian Z.Z., Fu Ch.Du. Research on Three-Component Geomagnetic Field Differential Measurement Method for Underwater Vehicle // *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 165–176
13. Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F. Sample 3D magnetometer for a dilution refrigerator // *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Vol. 400. P. 052037 (4 p.).
14. Zhernakov O.A., Frezinsky V.S. Cryogenic sensors in the inertial navigation systems. Publ. «Rumb», 1988. 204 p.
15. Belodedov M.V., Gorbachev V.V., Ichkitidze L.P. An application of the high-temperature superconducting materials: new opportunities // *Journal of RANS*. 2008. Vol. 8. No. 1. P. 12–16.



16. Can H., Topal U. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2015. Vol. 28. No. 3. P. 1093–1096.

17. Alexandrov E.B. Advances in quantum magnetometry for geomagnetic research // SPS. 2010. Vol. 180. No. 5. P. 509–519.

© Голев И. М., Никитина Е. А., 2017

Голев Игорь Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, ул. Старых Большевиков 54 А, vaiu@mail.ru

Никитина Елизавета Андреевна, кандидат физико-математических наук, преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, ул. Старых Большевиков 54 А, vaiu@mail.ru