

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЧИСТОТЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ФОРМАТА CUBESAT 1U ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. А. А. Рева¹, С. А. Богачев¹, А. С. Кириченко^{1,*}, И. П. Лобода¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: kirichenko@cosmos.ru

Поступила в редакцию 23.08.2023 г.

Работа посвящена анализу возможности реализации измерений магнитного поля Земли на борту малых космических аппаратов формата CubeSat 1U. В частности, была решена задача обеспечения магнитной чистоты для эксплуатации магнитометров в составе наноспутников. Проведены оценки необходимой точности аппаратуры и определен рекомендуемый максимальный уровень собственного магнитного поля космического аппарата – 0.1 нТл. Обеспечение требуемого значения фона магнитного поля возможно только при условии пространственного разнесения платформы и магнитометра – за счет специальной штанги. Для оценки ее минимальной длины было проведено моделирование магнитного поля наноспутника. Полученное значение составило 1575 см.

Ключевые слова: магнитометр, магнитное поле Земли, наноспутник, магнитная чистота

DOI: 10.31857/S0205961424020073, EDN: FOITDS

ВВЕДЕНИЕ

Изучение магнитного поля Земли можно считать одним из ключевых направлений космических исследований. Существует множество нерешенных фундаментальных задач в данной области. Так, на сегодняшний день малоизученным остается влияние солнечного ветра на земную магнитосферу, механизмы формирования авроральных дуг и ряд других вопросов солнечно-земной физики (Denton et al., 2016).

Исследования магнитного поля Земли носят также существенно прикладной характер, поскольку сегодня широко применяются активные и пассивные системы навигации и ориентации, принцип действия которых основан на измерении или взаимодействии с магнитным полем Земли (Овчинников и др., 2016). Также детальные карты магнитного поля Земли могут быть использованы при изучении строения литосферы и поиска полезных ископаемых (Абрамова и др., 2020; Копытенко и др., 2019).

Первые полноценные глобальные карты магнитного поля Земли были получены по данным спутников POGO в период с 1965 по 1971 годы (Cain, Sweeney, 1973). Необходимо, однако, отметить, что POGO регистрировал только скалярные величины интенсивности, но не векторные компоненты поля.

Первым же спутником, который позволил строить векторные карты магнитного поля Земли, стал Magsat, работавший в 1979–1980 гг. на низких орбитах 300–550 км (Langel et al., 1982). Началом периода современной космической магнитометрии можно считать запуск спутника Ørsted в 1999 году (Olsen et al., 2000). В его состав входил как скалярный, так и векторный магнитометры, а также звездный датчик для достижения высокой точности определения ориентации спутника. Совместные наблюдения Ørsted (высота орбиты 650–850 км) с запущенными позднее аппаратами CHAMP (высота орбиты 350–450 км) и SAC-C (высота орбиты порядка 700 км) позволили получить уникальные данные о структуре и параметрах магнитного поля Земли (Hulot et al., 2010).

На сегодня все большую популярность приобретает переход от единичных крупных спутников, несущих комплекс научной аппаратуры, к малым космическим аппаратам, характерный размер которых может составлять несколько десятков сантиметров (Hulot et al., 2021). Стоимость таких аппаратов невелика, что может позволить создавать достаточно крупные спутниковые группировки. Такой подход позволит регистрировать даже незначительные вариации магнитного поля Земли одновременно в совокупности точек на орбите.

Точность измерений, в первую очередь, определяется типом используемого магнитометра, однако есть ряд факторов, которые приводят к возникновению ошибок в данных. К ним можно отнести погрешности определения ориентации и положения спутника на орбите, влияние собственного магнитного поля космического аппарата, а также ряд эффектов, связанных с особенностями эксплуатации аппаратуры в космическом пространстве. Так, при движении спутника в плазме вследствие обтекания возникает спутный след и возмущения окружающего магнитного поля (Альперт и др., 1964). Также, сам аппарат является вторичным источником электромагнитного излучения, возникающим вследствие фотоэффекта — в первую очередь, за счет воздействия коротковолнового излучения Солнца на солнечные батареи. Однако последние два эффекта прямо зависят от габаритов и конфигурации спутника и могут давать существенный вклад только в случае крупных аппаратов. При использовании же малых платформ, таких как наноспутники, габариты которых имеют характерные размеры 10 см, указанные эффекты могут не приниматься в расчет из-за незначительного уровня соответствующих возмущений по сравнению с собственным магнитным полем аппарата, которое рассматривается в настоящей работе как ключевой источник искажений данных о магнитном поле. В статье приводятся оценки степени его влияния на данные, а также результаты поиска возможных технических решений, направленных на его устранение.

Благодаря тому, что магнитное поле спутника с расстоянием падает довольно быстро (как обратный куб), решение проблемы, как правило, обеспечивается за счет установки магнитометра на длинную раздвижную штангу. При этом длина для различных аппаратов может составлять от 1 (Розетта (Glassmeier et al., 2007), Венера-экспресс (Svedhem et al., 2007)) до 13 метров (Вояджер 1 и 2 (Behannon et al., 1977)).

Модели собственных магнитных полей и возможности создания конструкций раздвижных выносных систем для малых космических аппаратов и крупных спутников существенно различаются. В настоящей работе мы демонстрируем результаты моделирования собственного магнитного поля наноспутника формата CubeSat размера 1U ($100 \times 100 \times 100$ мм), проведенного с целью определения возможностей измерений магнитного поля Земли in-situ на аппаратах такого типа.

Структура работы следующая. В следующем разделе описаны исходные данные, взятые для построения модели, а также сам метод моделирования. В разделе 3 представлены полученные результаты. В разделе 4 обсуждаются полученные результаты и приводятся выводы, содержащие подходы к формированию концепции реализации измерений магнитного поля Земли на борту малых космических аппаратов.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Собственное магнитное поле наноспутников значительно меньше поля классических крупных космических аппаратов. В то же время конструктивные особенности малых платформ существенно ограничивают возможную длину выносных штанг магнитометров. При определении оптимальных характеристик штанги необходимо исходить из принципа разумной достаточности, когда фоновый уровень магнитного поля спутника обеспечивает решение основных задач прибора при минимально возможных габаритах конструкции.

В работе рассматривается возможность проведения измерений магнитного поля Земли на борту наноспутников, орбита которых, как правило, находится в районе 500 км. Колебания значений интенсивности глобального магнитного поля Земли на таких высотах лежат в диапазоне 10–60 тыс. нТл (Balogh, 2010). Необходимо отметить, что существует несколько видов вариаций поля. Например, суточные и спорадические. Оба типа связаны с воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли. Однако в первом случае они носят относительно постоянный и предсказуемый характер и связаны с тем, что “дневная” и “ночная” стороны магнитосферы существенно различаются. Вторая же компонента вариаций вызвана колебаниями потоков солнечного ветра. Соответствующие изменения магнитного поля могут составлять единицы нТл, и для их фиксации достаточным является уровень точности 0.1 нТл (Sutcliffe et al., 2011). Значение 0.1 нТл было выбрано в качестве максимального допустимого для собственного магнитного поля аппарата в точке нахождения магнитометра.

В качестве объекта моделирования мы выбрали наноспутник формата CubeSat размером 1U ($10 \times 10 \times 10$ см). В рассмотренной конструкции все внешние стороны аппарата одновременно являются его солнечными батареями, а выдвигная штанга раскрывается вдоль диагонали спутника. В случае размещения в качестве полезной нагрузки только магнитометра указанные габариты платформы являются достаточными — они позволяют разместить все необходимые служебные системы.

Источниками собственного магнитного поля спутника являются его токовые контуры. Если рассматривать стандартную структуру космического аппарата формата 1U, то, как правило, можно выделить базовую плату управления и питания, через которую проходят все основные электрические цепи. Необходимо также учитывать в модели генерирующие ток солнечные панели аппарата. В реальности функции электропитания и управления обычно разделяются по отдельным платам. При этом в состав платы питания входят аккумуляторы, обеспечивающие возможность

бесперебойной работы узлов аппарата даже в отсутствие освещенности солнечных панелей.

Солнечные батареи и плату электроники мы приближаем плоскостью, характеризуемой соответствующими поверхностными токами. Для получения замкнутого контура, в который входят солнечные батареи и плата электроники, мы также внесли в модель соединительные провода, рассматриваемые как однородные тонкие проводники с заданными линейными токами. Мы считаем допустимым приближение платы электроники и солнечных батарей поверхностными токами, несмотря на реальную сложную структуру электрических цепей. Выбранный подход обусловлен малым вкладом таких неоднородностей в конфигурацию поля по мере удаления от спутника на расстояния в несколько десятков сантиметров.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа, тонкий линейный проводник создает в точке пространства r_0 поле, описываемое следующим образом:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, I — сила тока, \mathbf{r} — радиус-вектор элемента контура тока длины L , вдоль которого производится интегрирование. Для плоского контура с плотностью тока \mathbf{j} расчет выполняется аналогичным образом с интегрированием по поверхности:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{j} \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3} ds.$$

Численное интегрирование для расчетной модели выполнялось с использованием функций `quad` (для одномерного интеграла) и `dblquad` (для двумерного интеграла), входящих в библиотеку `scipy.integrate` языка программирования Python 3. Перечисленные функции построены на базе методов библиотеки `QUADPACK` языка Fortran (Piessens et al., 1983) и позволяют интегрировать аналитически заданные функции с автоматически оптимизируемым шагом интегрирования. При моделировании сначала выполняется расчет магнитного поля, создаваемого в определенной точке пространства отдельными элементами источников, после чего производится интегрирование.

Токи, генерируемые солнечными батареями, напрямую зависят от падающих на них потоков излучения. В работе было рассмотрено несколько возможных пространственных конфигураций аппарата относительно Солнца, при которых засвечивалась одна, две и три панели аппарата. В качестве номинального тока, генерируемого одной панелью при нормальном падении излучения, было принято значение 0.28 А (максимальное значение для одной

из коммерческих моделей солнечных батарей наноспутников формата 1U). Засветка одной панели рассматривалась как случай нормального падения излучения на солнечную батарею. При одновременной засветке двух и трех батарей принималось, что Солнце равномерно освещает соответствующие панели. При этом учитывался фактор падения излучения под углом, отличным от нормали. Рассмотрены также были два случая работы аккумулятора платы питания в режиме максимального выходного тока. Первый случай соответствует темновому участку орбиты, когда отсутствует генерация тока батареями. Второй случай подразумевает работу в условиях освещенности Солнца, когда все узлы аппарата функционируют при максимальных токовых нагрузках. Для получения количественных оценок влияния работы аккумулятора на состояние окружающего магнитного поля была рассмотрена одна из плат электропитания, выпускаемая специализированной коммерческой организацией для аппаратов формата CubeSat. Максимальный выходной ток такой платы не превышает 5 А.

На рис. 1 показаны направления токов в контурах при рассмотрении каждой из солнечных панелей аппарата. Указанные выше конфигурации расчета, в которых происходит одновременная засветка одной, двух и трех панелей, являются комбинацией приведенных на рисунке случаев. Зеленым цветом показан контур платы электроники аппарата, синим — соединительные провода между платой и контуром солнечных батарей, оранжевым — контур солнечных батарей. Токковый контур узла электроники, состоящий из платы управления (зеленый цвет) и платы питания с аккумулятором (красный цвет) приведен на рис. 2. Расстояние между платами составляет 10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 проиллюстрированы результаты проведенного моделирования. Верхняя, средняя и нижняя панели демонстрируют уровень магнитного поля на различных расстояниях от аппарата для случаев одновременной засветки одной, двух и трех солнечных панелей, соответственно. Семейство приведенных на каждом из графиков решений соответствует различным взаимным конфигурациям освещаемых панелей, соединительных проводов и контура платы. Мы не уточняем для каждой из зависимостей конкретную конфигурацию, поскольку интерес представляет только максимальное значение поля. На нижней панели также показаны результаты моделирования при учете работы аккумулятора. Красная линия соответствует случаю, когда отсутствует ток, генерируемый солнечными батареями — единственным источником является аккумулятор. Зеленая линия описывает возмущения магнитного поля при предельных

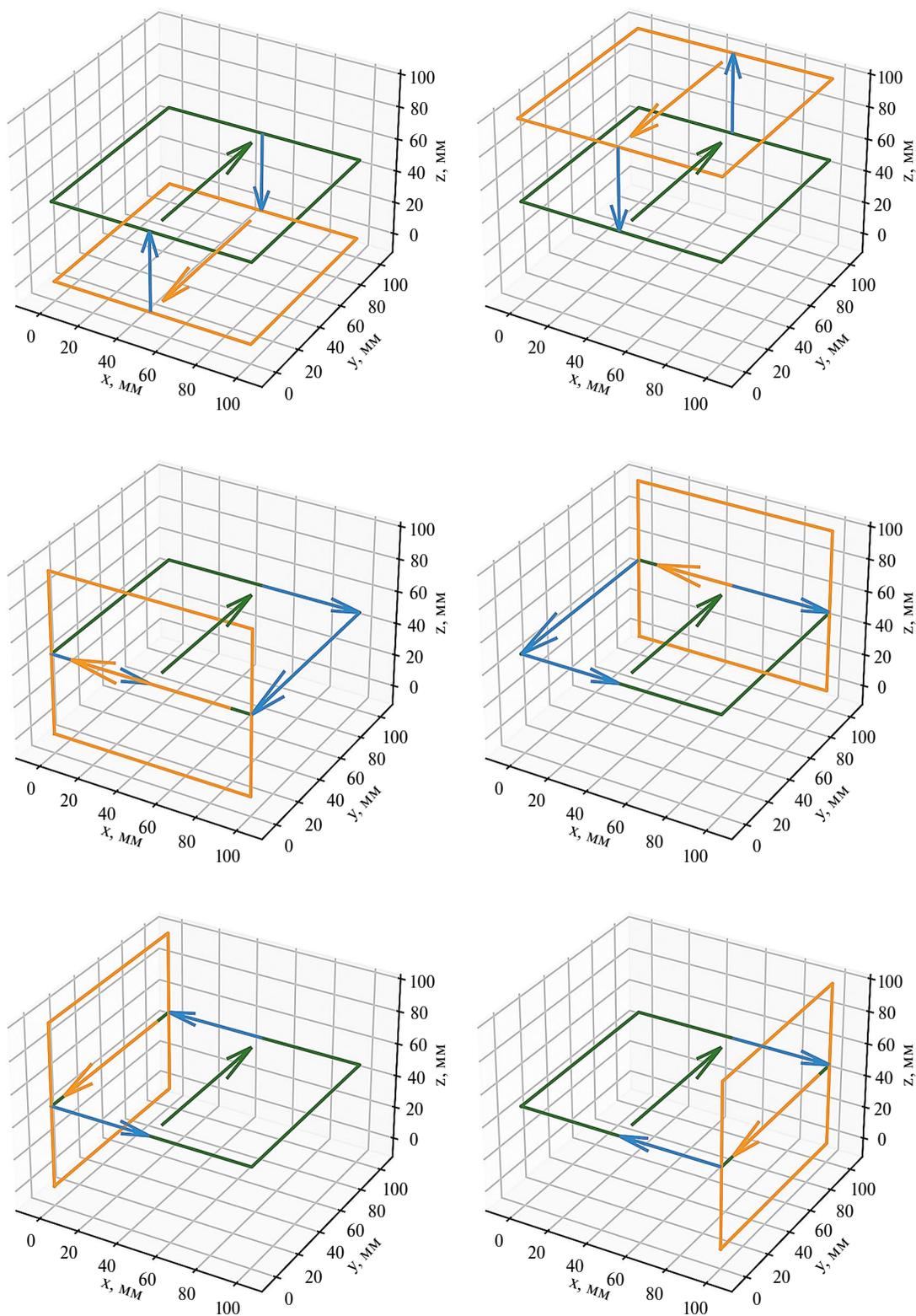


Рис. 1. Направления токов рассмотренных контуров в аппарате. Зеленым цветом показан контур, соответствующий плате электроники. Синим – соединительные провода. Оранжевым – панели солнечных батарей.

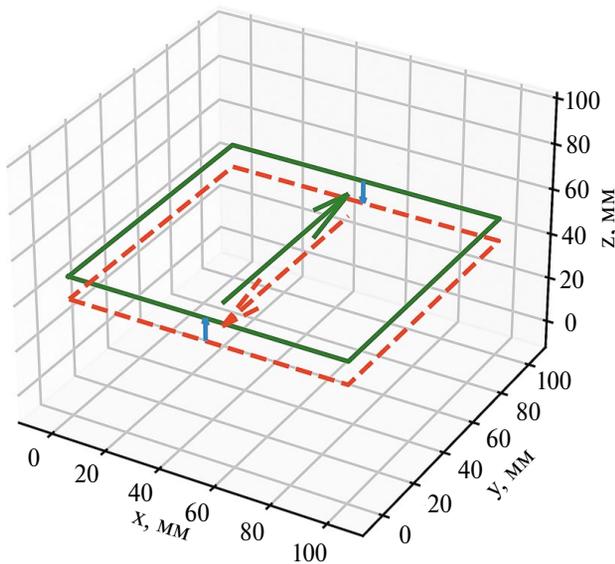


Рис. 2. Направления токов в контуре узла электроники. Зеленым цветом показан контур, соответствующий плате управления. Красным – плата питания, включающая в себя аккумулятор.

токовых нагрузках в аппарате – при освещении трех солнечных панелей и работе аккумулятора в режиме максимального выходного тока – 5 А. Приведенное на графике расстояние отсчитывается от внешней стороны аппарата вдоль его диагонали.

Согласно полученным результатам, собственное магнитное поле аппарата падает до заданного значения 0.1 нТл на расстоянии 1575 см от его внешней панели, что соответствует рекомендуемой минимальной длине выносной штанги. Несмотря на компактный размер самого аппарата его конструкция позволяет интегрировать в него узел с выдвинутой штангой необходимой длины. В качестве базового можно рассмотреть вариант композитной ленты, которая в сложенном состоянии наматывается на катушку и зачековывается (ZhongYi Chu, YiAn Lei, 2014). После расчеховки, за счет сил упругости происходит выпрямление ленты по всей ее длине. При этом удобным является размещение магнитометра также в катушке на другом конце ленты.

Важным является не только значение собственного магнитного поля аппарата, но также его стабильность. В случае постоянного фонового уровня не составляет труда делать на него поправку при анализе данных путем простого вычитания. Однако изменения собственного магнитного поля аппарата, связанные с колебаниями токовых нагрузок, существенно осложняют обработку. Возможны два подхода к решению проблемы. Первый носит частично аналитический характер. Колебания магнитного

поля в определенной точке пространства определяются расчетным методом на основании данных об изменении токов в контурах аппарата, содержащихся в телеметрии. Указанный метод является трудоемким и может приводить к значительным ошибкам при оценках. Второй вариант заключается в градуировании поля аппарата в ходе летной эксплуатации. Для этого в состав включается дополнительный магнитометр, однако штанга, на которой он размещается, имеет длину, отличную от основной. При этом оба магнитометра ориентируются в пространстве одинаково. В таком случае, расхождение сигнала двух магнитометров содержит только вклад от собственного поля аппарата с поправкой на соответствующие расстояния.

В качестве детектора рекомендуется использовать магниторезистивные датчики, позволяющие добиваться точности измерения магнитного поля в диапазоне 0.1–1 нТл. В целом, они более компактны по сравнению со стандартными феррозондовыми, что важно при интеграции приборов в состав малых космических аппаратов.

С учетом их невысокой стоимости возможно создание целого роя малых спутников, обеспечивающих одновременные комплексные измерения магнитного поля Земли сразу в обширной области пространства. При использовании одного спутника практически невозможно различить отклонения измеренного поля, обусловленные сменой магнитной конфигурации вследствие орбитального движения аппарата и, например, воздействием солнечного ветра. Кроме того, равномерное распределение большого числа спутников на орбите обеспечит наблюдения скорости и геометрии распространения возмущений, что позволит существенно расширить возможности исследования структуры магнитосферы Земли и происходящих в ней механизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность проведения комплексных исследований магнитного поля Земли с помощью аппаратуры на борту малых космических аппаратов формата CubeSat 1U. Показано, что достижимой является точность измерений не хуже 0.1 нТл при использовании специальной выдвинутой штанги не короче 1575 мм, что позволит строить не только детальные карты глобального магнитного поля Земли, но и фиксировать геомагнитные возмущения, вызываемые солнечной активностью. Невысокая стоимость создания аппаратов таких классов делает возможным формирование спутниковых группировок, способных в режиме реального времени отслеживать колебания магнитного поля Земли в обширной пространственной области.

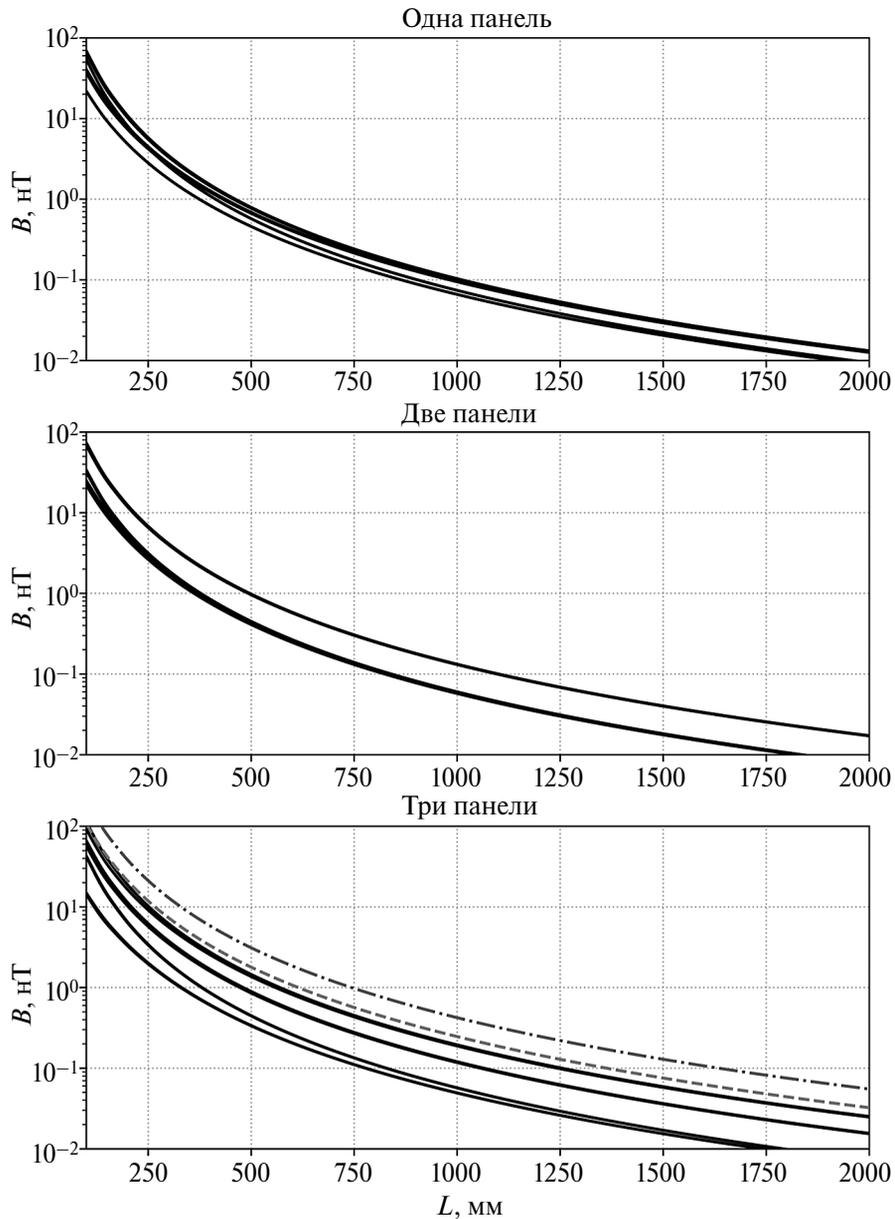


Рис. 3. Уровень собственного магнитного поля космического аппарата в зависимости от расстояния для случаев освещенности Солнцем одной (верхняя панель), двух (средняя панель) и трех (нижняя панель) солнечных батарей. Штриховой линией на нижней панели показан уровень собственного магнитного поля, создаваемого отдельно платой питания в режиме максимального выходного тока. Штрихпунктирная линия на нижней панели демонстрирует предельный уровень собственного магнитного поля при функционировании всех узлов аппарата.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-72-30002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в ис-

следованиях геолого-тектонического строения литосферы // Исследование Земли из Космоса. 2020. № 2. С. 69–81. DOI: 10.31857/S0205961420010029.

Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Путаевский Л.П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 382 с.

Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Алексеев В.Ф., Гурьев И.С., Лабецкий П.В. Применение высотных моделей магнитного поля земли для решения геофизических задач // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 3. С. 185–191. DOI: 10.1134/S0023420619030063.

- Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Ролдугин Д.С., Иванов Д.С. Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. 366 с.
DOI: 10.20948/mono-2016-ovchinnikov.
- Balogh A. Planetary Magnetic Field Measurements: Missions and Instrumentation // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 23–97. DOI: 10.1007/s11214-010-9643-1.
- Behannon K.W., Acuna M.H., Burlaga L.F., Lepping R.P., Ness N.F., Neubauer F.M. Magnetic Field Experiment for Voyagers 1 and 2 // Space Science Reviews. 1977. V. 21. Iss. 3. P. 235–257. DOI: 10.1007/BF00211541.
- Cain J.C., Sweeney R.E. The POGO data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 1232–1247. DOI: 10.1016/0021-9169(73)90021-4.
- Denton M.H., Borovsky J.E., Stepanova M., Valdivia J.A. Unsolved problems of magnetospheric physics // J Geophys Res. 2016. V. 121. No. 11. P. 10783–10785. DOI: 10.1002/2016JA023362.
- Glassmeier K., Boehnhardt H., Koschny D., Kührt E., Richter I. The Rosetta Mission: Flying Towards the Origin of the Solar System // Space Science Reviews. 2007. V. 128. Iss. 1–4 P. 1–21. DOI: 10.1007/s11214-006-9140-8.
- Hulot G., Leger J.-M., Clausen L.B.N., Deconinck F., Coisson P., Vigneron P., Alken P., Chulliat A., Finlay Ch.C., Grayver A., Kuvshinov A., Olsen N., Thébaud E., Bertrand F., Jager T., Häfner T. NanoMagSat, a 16U nanosatellite constellation high-precision magnetic project to initiate permanent low-cost monitoring of the Earth's magnetic field and ionospheric environment // EGU General Assembly. 19–30 Apr 2021, EGU21–14660. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14660.
- Hulot G., Finlay C.C., Constable C.G., Olsen N., Manda M. The Magnetic Field of Planet Earth // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 159–222. DOI: 10.1007/s11214-010-9644-0.
- Langel R., Ousley G., Berbert J., Murphy J., Settle M. The MAGSAT mission // Geophysical Research Letters. 1982. V. 9. Iss. 4. P. 243–245. DOI: 10.1029/GL009i004p00243.
- Olsen N., Holme R., Hulot G., Sabaka T., Neubert T., Toffner-Clausen L., Primdahl F., Jørgensen J., Leger J.-M., Barraclough D., Bloxham J., Cain J., Constable C., Golovkov V., Jackson A., Kotze P., Langlais B., Macmillan S., Manda M., Merayo J., Newitt L., Purucker M., Risbo T., Stampe M., Thomson A., Voorhies C. Ørsted Initial Field Model // Geophysical Research Letters. 2000. V. 27. Iss. 22. P. 3607–3610. DOI: 10.1029/2000GL011930.
- Piessens R., de Doncker-Kapenga E., Überhuber Ch.W., Kahaner D. QUADPACK: A subroutine package for automatic integration. Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-12553-2. 1983. DOI: 10.1007/978-3-642-61786-7.
- Sutcliffe P.R., Ndiitwani D.C., Luhr H., Heilig B. Studies of Geomagnetic Pulsations Using Magnetometer Data from the CHAMP Low-Earth-Orbit Satellite and Ground-Based Stations: a Review // Data Sci. J. 2011. V. 10, IAGA10-IAGA18. DOI: 10.2481/dsj.IAGA-03.
- Svedhema H., Titov D.V., McCoy D., Lebreton J.-P., Barabash S., Bertaux J.-L., Drossarte P., Formisano V., Häusler B., Korabely O., Markiewicz W.J., Nevejans D., Pätzold M., Piccioni G., Zhang T. L., Taylor F.W., Lellouch E., Koschny D., Witasse O., Eggel H., Warhaut M., Accomazzo A., Rodriguez-Canabal J., Fabrega J., Schirmann T., Clochet A., Coradini M. Venus Express – The first European mission to Venus // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. Iss. 12. P. 1636–1652. DOI: 10.1016/j.pss.2007.01.013.
- ZhongYi Chu, YiAn Lei. Design theory and dynamic analysis of a deployable boom // Mechanism and Machine Theory. 2014. V. 71. P. 126–141. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.09.009.

Magnetic Cleanliness of CubeSat 1U Satellites for Measuring Earth's Magnetic Field

A. A. Reva¹, S. A. Bogachev¹, A. S. Kirichenko¹, I. P. Loboda¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

The work is devoted to the analysis of the possibility of implementing measurements of the Earth's magnetic field on board small spacecraft of the CubeSat 1U format. In particular, the problem of ensuring magnetic purity for the operation of magnetometers as part of nanosatellites was solved. The required accuracy of the equipment was estimated and the recommended maximum level of the spacecraft's residual magnetic field was determined – 0.1 nT. Ensuring the required value of the background of the magnetic field is possible only if the platform and the magnetometer are spaced apart - due to a special boom. To estimate its minimum length, the simulation of the magnetic field of the nanosatellite was carried out. The resulting value was 1250 cm.

Keywords: magnetometer, Earth's magnetic field, nanosatellite, magnetic cleanliness

REFERENCES

- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. About possibilities of satellite observations application to the Earth geological-tectonic structure study // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2020. № 2. P. 69–81. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420010029.
- Alpert Ya.L., Gurevich A.V., Pitaevskiy L.P. Artificial satellites in low-density plasma. Moscow: Nauka, 1964. 382 p. (In Russian).
- Kopytenko Y.A., Petrova A.A., Aleksseev V.F., Gur'ev I.S., Labetskiy P.V. Application of altitude models of Earth's magnetic field for solving geophysical problems // Kosmicheskie issledovaniya. 2019. T. 57. № 3, P. 185–191. (In Russian). DOI: 10.1134/S0023420619030063.
- Ovchinnikov M. Yu., Penkov V.I., Roldugin D.S., Ivanov D.S. Magnetic orientation systems for small spacecrafts. Moscow: IPM im. M. V. Keldysha, 2016. 366 p. (In Russian). DOI: 10.20948/mono-2016-ovchinnikov.
- Balogh A. Planetary Magnetic Field Measurements: Missions and Instrumentation // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 23–97. DOI: 10.1007/s11214-010-9643-1.

- Behannon K.W., Acuna M.H., Burlaga L.F., Lepping R.P., Ness N.F., Neubauer F.M.* Magnetic Field Experiment for Voyagers 1 and 2 // *Space Science Reviews*. 1977. V. 21. Iss. 3. P. 235–257. DOI: 10.1007/BF00211541.
- Cain J.C., Sweeney R.E.* The POGO data // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1973. Vol. 35. P. 1232–1247. DOI: 10.1016/0021-9169(73)90021-4
- Denton M.H., Borovsky J.E., Stepanova M., Valdivia J.A.* Unsolved problems of magnetospheric physics // *J Geophys Res.* 2016. V. 121. No. 11. p. 10783–10785. DOI: 10.1002/2016JA023362.
- Glassmeier K., Boehnhardt H., Koschny D., Kührt E., Richter I.* The Rosetta Mission: Flying Towards the Origin of the Solar System // *Space Science Reviews*. 2007. V. 128. Iss. 1–4. P. 1–21. DOI: 10.1007/s11214-006-9140-8.
- Hulot G., Leger J.-M., Clausen L.B.N., Deconinck F., Coïsson P., Vigneron P., Alken P., Chulliat A., Finlay Ch.C., Grayver A., Kuvshinov A., Olsen N., Thébaud E., Bertrand F., Jager T., Häfner T.* NanoMagSat, a 16U nanosatellite constellation high-precision magnetic project to initiate permanent low-cost monitoring of the Earth's magnetic field and ionospheric environment // *EGU General Assembly*. 19–30 Apr 2021, EGU21–14660. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14660.
- Hulot G., Finlay C.C., Constable C.G., Olsen N., Manda M.* The Magnetic Field of Planet Earth // *Space Sci Rev.* 2010. V. 152. P. 159–222. DOI: 10.1007/s11214-010-9644-0.
- Langel R., Ousley G., Berbert J., Murphy J., Settle M.* The MAGSAT mission // *Geophysical Research Letters*. 1982. Vol. 9. Iss. 4. P. 243–245. DOI: 10.1029/GL009i004p00243.
- Olsen N., Holme R., Hulot G., Sabaka T., Neubert T., Toffner-Clausen L., Primdahl F., Jørgensen J., Leger J.-M., Barraclough D., Bloxham J., Cain J., Constable C., Golovkov V., Jackson A., Kotze P., Langlais B., Macmillan S., Manda M., Merayo J., Newitt L., Purucker M., Risbo T., Stampe M., Thomson A., Voorhies C.* Ørsted Initial Field Model // *Geophysical Research Letters*. 2000. V. 27. Iss. 22. P. 3607–3610. DOI: 10.1029/2000GL011930.
- Piessens R., de Doncker-Kapenga E., Überhuber Ch.W., Kahaner D.* QUADPACK: A subroutine package for automatic integration. Springer-Verlag. ISBN978-3-540-12553-2. 1983. DOI: 10.1007/978-3-642-61786-7.
- Sutcliffe P.R., Ndiitwani D.C., Luhr H., Heilig B.* Studies of Geomagnetic Pulsations Using Magnetometer Data from the CHAMP Low-Earth-Orbit Satellite and Ground-Based Stations: a Review // *Data Sci. J.* 2011. V. 10, IAGA10-IAGA18. DOI: 10.2481/dsj.IAGA-03.
- Svedhema H., Titov D.V., McCoy D., Lebreton J.-P., Barabash S., Bertaux J.-L., Drossart P., Formisano V., Häusler B., Korabely O., Markiewicz W.J., Nevejans D., Pätzold M., Piccioni G., Zhang T.L., Taylor F.W., Lellouch E., Koschny D., Witasse O., Eggel H., Warhaut M., Accomazzo A., Rodriguez-Canabal J., Fabrega J., Schirrmann T., Clochet A., Coradini M.* Venus Express – The first European mission to Venus // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. Iss. 12. P. 1636–1652. DOI: 10.1016/j.pss.2007.01.013.
- ZhongYi Chu, YiAn Lei.* Design theory and dynamic analysis of a deployable boom // *Mechanism and Machine Theory*. 2014. V. 71. P. 126–141. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.09.009.