

ВЕРИФИКАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

В. В. Корнелюк

Белорусский государственный университет, г. Минск;

vlad.kornelyuk@mail.ru;

науч. рук. – С. В. Василенко, ассистент

В данной работе произведена процедура верификации программной реализации модели магнитного поля Земли путём точечного сравнения её показаний с показаниями онлайн-калькулятора геомагнитного поля, размещённого на сайте Британской геологической службы. В качестве модели геомагнитного поля использовалась Всемирная магнитная модель (WMM). Кроме того, проанализирована зависимость точности и вычислительной сложности задачи расчёта геомагнитного поля от количества используемых коэффициентов модели WMM. Найдено оптимальное по соотношению «точность – время расчёта» количество коэффициентов при использовании модели в составе подсистемы ориентации наноспутника.

Ключевые слова: магнитное поле Земли; модель геомагнитного поля; World Magnetic Model (WMM); International Geomagnetic Reference Field (IGRF); верификация; система ориентации наноспутника.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, планета Земля обладает собственным магнитным полем, источником которого является жидкое вещество ядра планеты, а также намагниченные породы земной коры. Посредством наземных и орбитальных геофизических наблюдений были составлены аналитические модели магнитного поля Земли, которые отличаются по точности и сложности расчёта, среди них модели прямого и наклонного диполей, IGRF, WMM, осреднённая и др. Модель магнитного поля Земли позволяет определить вектор магнитного поля в любой точке околоземного пространства.

Модели геомагнитного поля используются в задачах навигации воздушных и водных судов, ориентации космических аппаратов (КА), лабораторной симуляции магнитного поля Земли при разработке КА и др. Такие важные применения выдвигают повышенные требования к точности и надёжности математических моделей и программного обеспечения. Вот почему перед использованием программной реализации той или иной математической модели необходимо проверить правильность её работы, т. е. верифицировать.

Одним из возможных вариантов применения данной модели является задача определения ориентации наноспутника относительно Земли по показаниям бортового магнитометра. Наноспутники формата CubeSat имеют размеры порядка 10 см^3 , ограниченный энергобюджет и, как

следствие, скромные вычислительные мощности бортовых процессоров. Данный факт заставляет разработчиков искать возможности снижения вычислительной сложности решаемых задач.

В данной работе описана процедура верификации программной реализации Всемирной магнитной модели (WMM) [1], а также обоснована возможность снижения вычислительной сложности задачи без снижения общей точности определения ориентации. WMM – это популярная, регулярно обновляющаяся и очень точная модель геомагнитного поля. Её реализация была взята с официального сайта организации «Национальные центры информации об окружающей среде», США [2].

ВЕРИФИКАЦИЯ

Исходный программный код, реализующий модель магнитного поля Земли, был взят с официального сайта организации «Национальные центры информации об окружающей среде» (США) [2] и использовался в качестве проверяемого образца. Данная реализация сравнивалась с онлайн-калькулятором геомагнитного поля, размещённого на официальном сайте Британской геологической службы [3]. В качестве входных данных для процедуры верификации использовалось около 28000 точек, равномерно распределённых по орбите наноспутника BSUSAT-1. Результаты сравнения представлены на рис. 1.

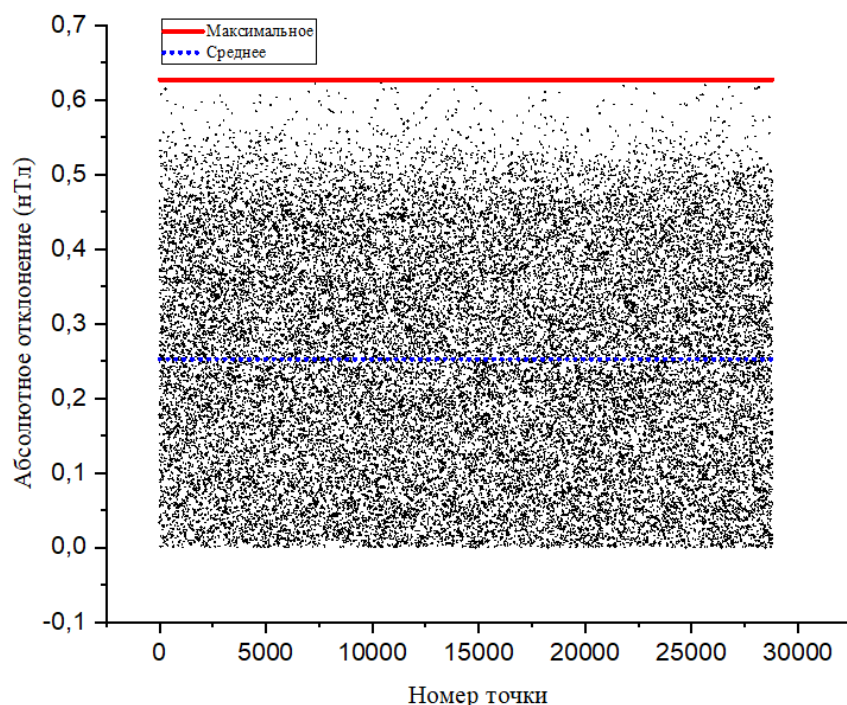


Рис. 1. Абсолютное отклонение верифицируемой реализации от онлайн-калькулятора

Как видно из рис. 1, верифицируемая реализация хорошо согласуется с онлайн-калькулятором сайта [3] и абсолютное отклонение не превосходит величину 1 нТл.

СНИЖЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ЗАДАЧИ

В модели WMM [1] магнитное поле Земли аппроксимируется сферическими гармоническими функциями – нормализованными по Шмидту присоединёнными полиномами Лежандра до степени и порядка 12 включительно. Модель содержит 168 коэффициентов Гаусса, определяющих магнитное поле на начало эпохи 2020.0, а также 168 коэффициентов, отвечающих за изменение магнитного поля во времени в течении пятилетней эпохи до 2025.0. Каждая уникальная комбинация степени n и порядка m ($m \leq n$, $0 < n \leq 12$) сферической гармоники имеет свой набор коэффициентов. Всего таких наборов – 90.

Был произведён вычислительный эксперимент для определения зависимости времени и ошибки расчёта магнитного поля от числа используемых наборов коэффициентов. В качестве входных данных использовалось 68000 точек орбиты спутника BSUSAT-1. Число наборов коэффициентов изменялось от 1 до 90.

Результаты эксперимента показаны на рис. 2 и 3.

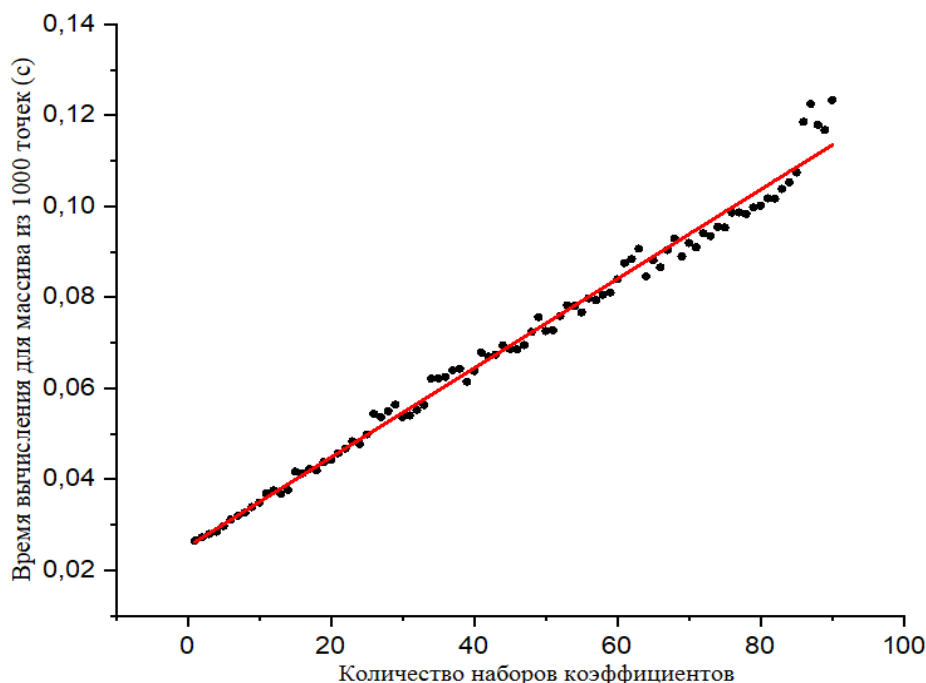


Рис. 2. Зависимость времени вычислений от количества коэффициентов модели WMM. Вычисления проводились на процессоре Intel Core i5-8300H

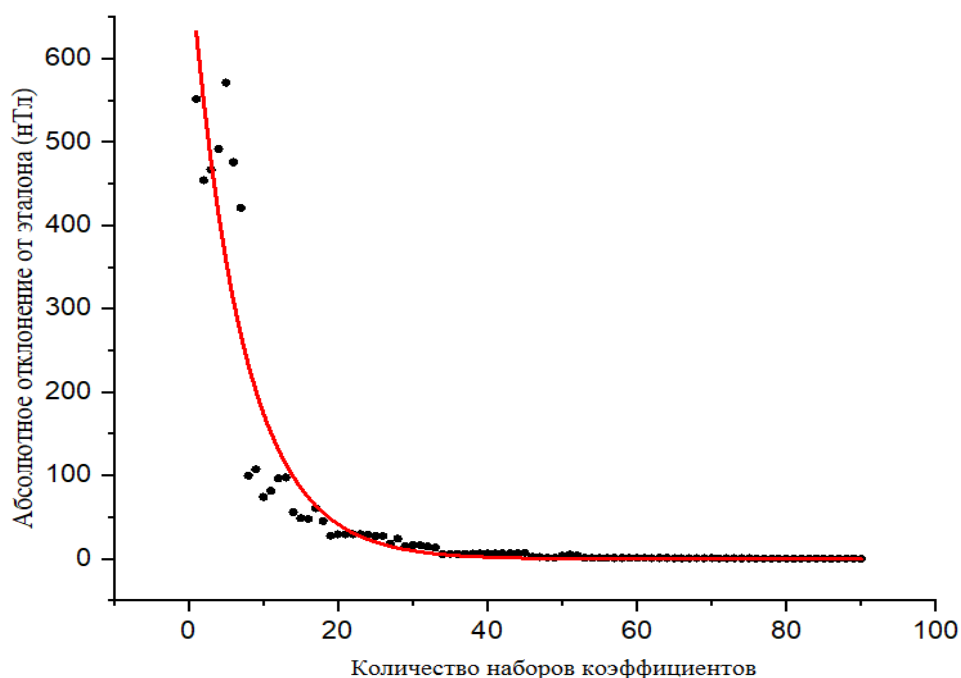


Рис. 3. Зависимость усреднённого абсолютного отклонения от количества наборов коэффициентов

В эксперименте по определению ошибки расчёта за точное значение магнитного поля принималось значение при полном наборе коэффициентов модели.

Из результатов исследования следует, что в системе определения ориентации наноспутника по магнитному полю допустимо использовать реализацию модели WMM с количеством наборов коэффициентов в 10-15, при котором ошибка составляет около 100 нТл, что соответствует точности бортовых MEMS-магнитометров [4]. Это позволит уменьшить время расчёта магнитного поля примерно в 3 раза.

Библиографически ссылки

1. World Magnetic Model 2020. Report. [Electronic resource]. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2020/WMM2020_Report.pdf (date of access: 24.05.2020).
2. Страница на сайте организации «Национальные центры экологической информации США» [Electronic resource]. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml#downloads> (date of access: 20.05.2020).
3. Онлайн-калькулятор геомагнитного поля на сайте организации «Британская геологическая служба» [Electronic resource]. URL: http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html (date of access: 20.05.2020).
4. LSM9DS, iNEMO inertial module, 3D magnetometer, 3D accelerometer, 3D gyroscope. [Electronic resource]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm9ds1.pdf> (date of access: 24.05.2020).