

ИМИТАЦИОННЫЙ МАКЕТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ МАГНИТОГРАДИЕНТНЫХ СИСТЕМ

А.К. Волковицкий, А.И. Гладышев, Д.А. Гольдин, Е.В. Каршаков, Б.В. Павлов,
М.Ю. Тхоренко (Москва)

Введение

Многие практически важные задачи требуют активного управления магнитным полем подвижных объектов. К числу таких задач, например, относятся: задача подавления влияния носителя на показания бортового магнитоизмерительного оборудования при аэромагнитной съемке [1], задача уменьшения собственного поля подводного аппарата для обеспечения его скрытности [2]. Отметим, что если в первом случае компенсация поля носителя может осуществляться аналитически, при обработке полученной измерительной информации, то решение второй задачи требует наличия на борту подвижного объекта специальной размагничивающей системы, представляющей из себя набор обмоток с током и способной в определенной мере компенсировать собственное магнитное поле подвижного объекта. Ясно, что качество функционирования такой размагничивающей системы сильно зависит от выбора законов управления током в обмотках. В работе [3] предложена оригинальная схема управления компенсирующими токами, основанная на оценивании параметров дипольного магнитного момента (ДММ) подвижного объекта с использованием измерений градиента магнитного поля, проводимых в реальном времени с использованием специальной измерительной системы, с последующим учетом полученных оценок ДММ при управлении токами размагничивающего устройства. Для оценки работоспособности данной схемы компенсации для управления магнитным полем подвижного объекта (ПО), был разработан имитационный макет бортовой магнитоградиентной измерительной системы, учитывающий как особенности движения ПО и измерителя, так и различные помехи от естественных и искусственных источников. Описанию данного макета и посвящена настоящая статья.

1. Общая структура компьютерного макета

Компьютерный имитационный макет представляет из себя совокупность программных модулей, функционирующих в режиме имитационного моделирования взаимодействия ферромагнитных объектов с естественным магнитным полем Земли (МПЗ) и работы различных магнитоградиентных измерительных систем в условиях, как движения объекта, так и измерительной установки. Программные средства, составляющие макет, разработаны авторами на языке программирования C++ полностью самостоятельно, и могут быть запущены на любой ЭВМ под управлением операционных систем семейства Linux. Имитационное моделирование выполняется в режиме реального времени. Информационное взаимодействие в структуре макета осуществляется в режиме «клиент-сервер». Центральным элементом (сервером) в данной схеме является специальный программный модуль, управляющий и координирующий работу всей структуры макета, а также записывающий модельные данные в файлы для последующего анализа.

Кроме «сервера» в составе системы имеются служебные модули (клиенты) двух принципиально разных типов: модули, реализующие алгоритмы математического моделирования виртуальных объектов, систем и процессов (виртуальные устройства); модули пользовательского интерфейса, предоставляющие специалисту-исследователю возможность визуализации всех необходимых параметров.

Общая архитектура компьютерной программы изображена на рис. 1. Далее рассмотрим назначение, структуру и алгоритмы работы каждого из модулей в составе макета.

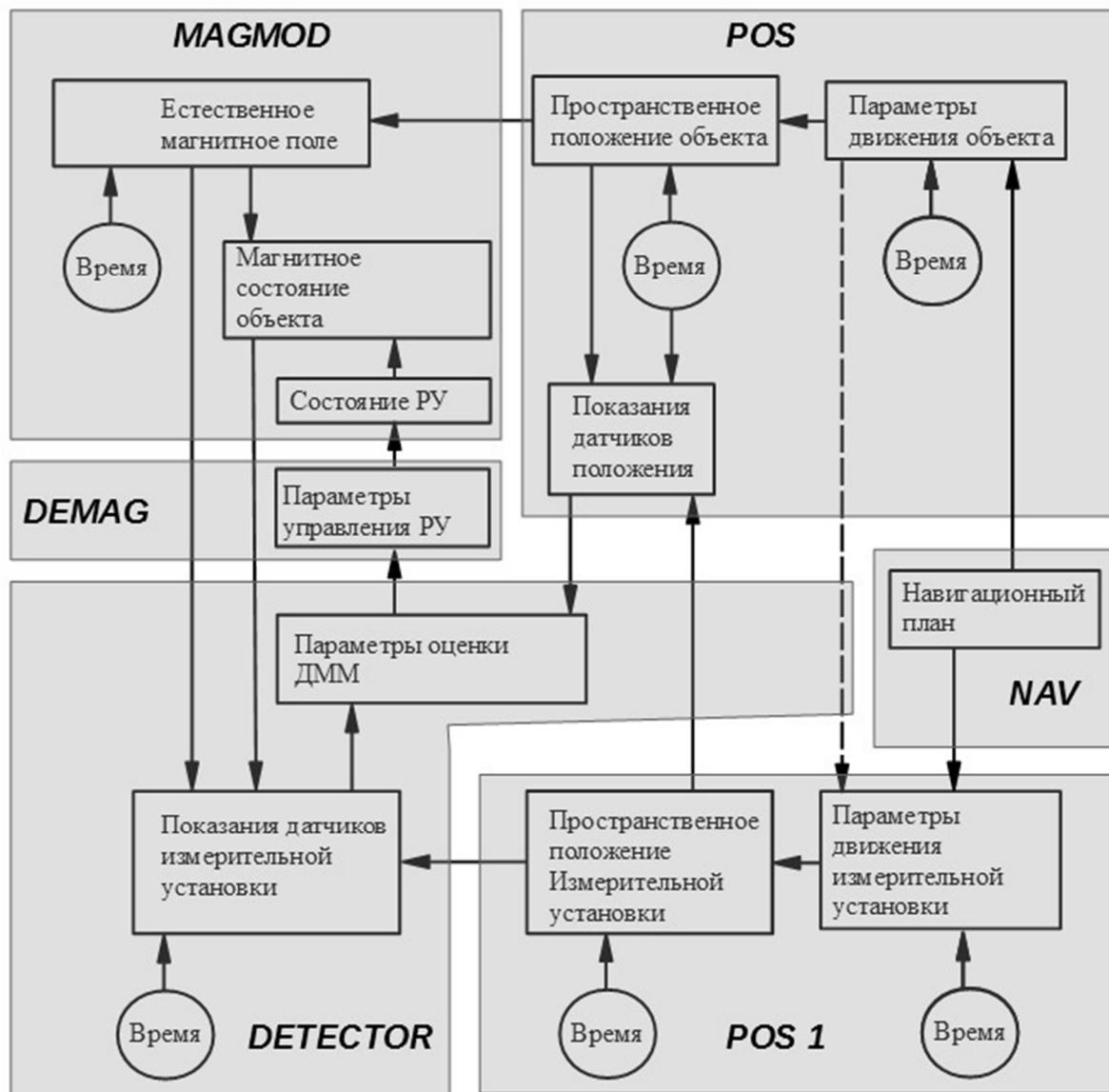


Рис. 1. Архитектура имитационного макета (здесь magmod – модуль определения магнитного поля; pos, pos1, nav – модули имитации движения; demag, detector – модули, предназначенные для формирования измерений и оценки по ним компонент вектора ДММ)

2. Модуль имитации движения подвижного объекта

Задачей модуля определения навигационных параметров является выработка данных о положении, скорости и ориентации ПО и измерителя в различные моменты времени. Отметим, что т.к. требуется определять два набора параметров движения (для ПО и для измерительной системы), то модуль определения навигационных параметров состоит из двух частей, каждая из которых вырабатывает параметры для одного объекта (ПО или измерителя). При этом есть возможность задавать как независимые, так и зависимые законы движения ПО и измерителя. Последний случай реализуется, если определение параметров ДММ осуществляется по схеме с буксируемым за ПО магнитоградиентометром, как описано в работе [3]. Заметим, что анализ результатов имитационного моделирования требует, с одной стороны, точного задания

навигационного плана (сценария) для каждого из вычислительных экспериментов и, соответственно, точного следования этому плану. С другой стороны, необходимо ориентироваться на максимальную степень соответствия модели реальным физическим процессам, в т.ч. управлять виртуальным ПО так, чтобы его движение было подобно тому, что происходит в реальности. Для удовлетворения данным требованиям авторами был разработан модуль определения навигационных параметров, в котором управление виртуальным движением осуществляется в соответствии с навигационным планом (заданием), причем управление движением в значительной мере сходно с управлением, осуществляемым экипажем судна – штурманом и рулевым.

Имитационное моделирование процесса проводки виртуального объекта по траекториям, заданным навигационным планом, в структуре макета может осуществляться в двух режимах – «ручном» (движением объекта управляет оператор с клавиатуры) и автоматическом (работу оператора выполняет программа, имитируя действия оператора). Для удобства управления проводкой предусмотрено формирование вспомогательной управляющей информации, которая служит подсказкой для оператора при ручном управлении, и составляет основу для работы виртуального авторулевого. Подробно алгоритм вычисления навигационных параметров описывается в работах [4, 5].

3. Модуль определения параметров магнитного поля

При вычислении магнитного поля вблизи подвижного объекта предполагается, что это поле создается следующими источниками: постоянной составляющей магнитного поля ПО, вызванной постоянным («жестким») намагничением материалов корпуса и работой бортового электрооборудования, а также переменной составляющей магнитного поля ПО, вызванной переменным («мягким») намагничением корпуса; нормальной составляющей МПЗ; вариационной составляющей МПЗ; полем магнитных аномалий; промышленными помехами (что актуально при береговом расположении магнитоизмерительной системы). Результирующее магнитное поле вычисляется как сумма полей этих источников. Рассмотрим процесс вычисления каждой из вышеописанных составляющих более подробно.

При вычислении постоянной составляющей магнитного поля ПО предполагается, что внутри корпуса ПО находятся виртуальные источники постоянного (жесткого) намагничения, представляемые в форме системы локальных дипольных излучателей в системе координат, жестко связанной с корпусом ПО. Модельными параметрами являются их дипольные магнитные моменты M_i (здесь мы обозначили трехмерные векторы как вектор-столбцы) и координаты центров r_i , суммарное поле вычисляется как [6]:

$$B_p = \sum_i \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(M_i R_i)R_i - M_i R_i^2}{R_i^5}, R_i = r_i - r, \quad (1)$$

где за r обозначен радиус-вектор точки наблюдения.

Для определения намагничения корпуса, представляемого эллипсоидальной оболочкой, заметим, что магнитное поле, создаваемое оболочкой, может быть представлено в виде градиента некоторого скалярного потенциала u , являющегося решением краевой задачи для уравнения Лапласа [7]. Потенциал, являющийся решением этой задачи, как показано в работе [8], представим в виде следующего разложения по сферическим функциям (здесь u_1 – потенциал снаружи от оболочки, u_2 – в стенках оболочки, а u_3 – внутри оболочки):

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \sum \sum D_{nm} Q_n^m(\eta) Y_n^m(\theta, \phi)^m, \\
 u_2 &= \sum \sum (B_{nm} Q_n^m(\eta) + C_{nm} P_n^m(\eta)) Y_n^m(\theta, \phi), \\
 u_3 &= \sum \sum A_{nm} P_n^m(\eta) Y_n^m(\theta, \phi),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Коэффициенты $A_{nm}, B_{nm}, C_{nm}, D_{nm}$ определяются из граничных условий.

Для вычисления нормальной составляющей МПЗ в данном макете используется модель IGRF 13 [9]. Вариационная составляющая магнитного поля представляется в виде суммы синусоидальных составляющих:

$$B_v = \sum_i (C_i \cos \omega_i t + S_i \sin \omega_i t), \tag{3}$$

значения C_i, S_i, ω_i являются входными параметрами и задаются в файле настроек. В качестве модели аномального поля используется синтетическая модель, построенная как потенциал случайно распределенных в квадрате 10×10 км диполей, палитра которых периодически повторяется. При моделировании задается глубина слоя, в котором распределены диполи, равная 1 км, а также максимальная амплитуда дипольного момента в диапазоне ± 25 МАм². Наконец, для моделирования промышленных помех используется поле системы бесконечно тонких нитей, питаемых синусоидальным током промышленной частоты (50 Гц, 60 Гц). Для магнитного поля нити с током имеет простое аналитическое выражение [6]; поле же системы нитей является просто векторной суммой полей отдельных нитей.

4. Модуль определения параметров ДММ

Данный модуль отвечает как за моделирование процесса магнитных измерений, так и определение ДММ по данным этих измерений. Рассмотрим сначала процесс моделирования измерений.

В структуре макета осуществляется моделирование работы измерителя, построенного по пространственно разнесенной схеме компоновки датчиков (рис. 2). Виртуальная установка представлена в виде правильной четырехгранной пирамиды, в четырех вершинах которой установлены магниточувствительные датчики (обозначены Д1 – Д4). Кроме того, предполагается, что установка в своем составе имеет блоки системы ориентации (обозначена ГИС), позволяющие определить пространственное и угловое положение.

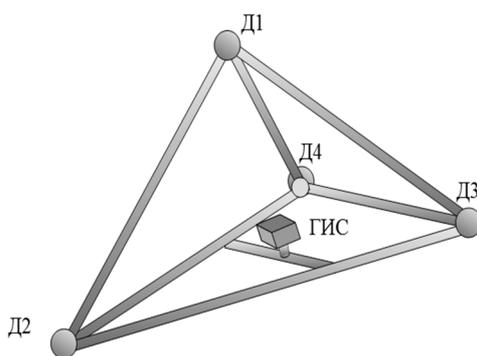


Рис. 2. Магнитоградиентная измерительная установка на разнесенных датчиках

В структуре макета предусмотрена возможность моделирования работы измерительной установки с использованием магнитных датчиков трех различных типов: скалярные квантовые датчики [10]; векторные трехкомпонентные датчики высокой чувствительности и точности (СКВИД) [11]; векторные трехкомпонентные датчики низкой чувствительности и точности (феррозондовые магнитометры) [10]. Первый вариант соответствует векторному магнитоградиентометру, второй и третий варианты – тензорному магнитоградиентометру.

Имитация работы магниточувствительных датчиков всех трех типов производится по одной и той же схеме: на каждый квант системного времени выполняются следующие действия:

- с использованием процедур модуля навигации вычисляются модельные параметры положения каждого из датчиков виртуальной установки;
- полученные значения искажаются для моделирования механических колебаний корпуса измерительной системы;
- для новых параметров положения в системе координат, связанной с каждым из датчиков, вычисляются значения компонент модельного магнитного поля;
- параметры «истинного» вектора поля подвергаются процедуре виртуального измерения в соответствии с параметрами модели измерительных свойств датчика;
- значения углов ориентации блока «истинных» параметров положения также подвергаются процедуре виртуального измерения, то есть вычисляются «измеренные» параметры вектора угловой ориентации, отличающиеся от «истинных» влиянием систематических искажений.

Совокупность вычисленных «измеренных» параметров образует набор входных данных для алгоритма определения параметров ДММ.

Дадим теперь краткое изложение алгоритма оценивания параметров ДММ по измерениям магнитного поля. Введем вектор оцениваемых параметров:

$$x = (r_1, r_2, r_3, m_1, m_2, m_3) \quad (4)$$

где r_i – компоненты вектора поправок к некоей априорной оценке радиус-вектора r точки расположения диполя, m_i – компоненты вектора поправок к априорной оценке вектора M дипольного момента:

$$X = X_0 + x, \quad X_0 = (\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \tilde{r}_3, \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \tilde{M}_3). \quad (5)$$

Введем также вектор измерений покомпонентных разностей показаний векторных датчиков:

$$z = (z_{121}, z_{122}, z_{123}, z_{231}, z_{232}, z_{233}, z_{241}, z_{242}, z_{243}), \quad (6)$$

Несмотря на то, что всего измеряется 18 таких разностей для четырех датчиков, только 9 можно считать независимыми, поскольку любая другая компонента разностей может быть выражена через параметры вектора z . Введем вектор, содержащий параметры градиента (разностей компонент поля):

$$G = (G_{121}, G_{122}, G_{123}, G_{231}, G_{232}, G_{233}, G_{241}, G_{242}, G_{243}), \\ G_{ijk} = B_{ik} - B_{jk}, \quad (7)$$

В работе [3] показано, что G_{ijk} , r и M связаны соотношением:

$$G_{ijk} = f_{ijk}(r, M), \quad (8)$$

где f_{ijk} – известные нелинейные функции. Для решения данного класса задач можно применить нелинейное обобщение фильтра Калмана – IEKF [12, 13, 14, 15]. Аналогичный подход можно применить и при решении задачи об определении параметров ДММ по данным измерений вектора градиента. Единственное отличие будет заключаться в том, что в уравнение для измерений войдут не разности компонент векторов поля, а разности их модулей.

Численные эксперименты показывают, что при не слишком больших ошибках априорных значений r и M и шумах измерений, описанный алгоритм всегда сходится к истинным значениям параметров ДММ (подробнее см. [3]).

5. Примеры моделирования с помощью макета

Для демонстрации работоспособности описанных алгоритмов определения ДММ по параметрам градиента магнитного поля в точке расположения детектора авторами проведен ряд численных экспериментов с использованием рассматриваемого макета. Результаты некоторых экспериментов излагаются ниже.

В ходе первого эксперимента моделировалась простейшая возможная ситуация: движение объекта с буксируемым за ним на гибком тросе детектором по прямолинейному маршруту; при этом в качестве поля объекта выступало поле точечного магнитного диполя, поля магнитных аномалий и промышленных помех не учитывались. Результаты данного эксперимента отражены на рис. 3 и 4 (на рис. 4 на правой шкале все значения умножаются на 10^6).

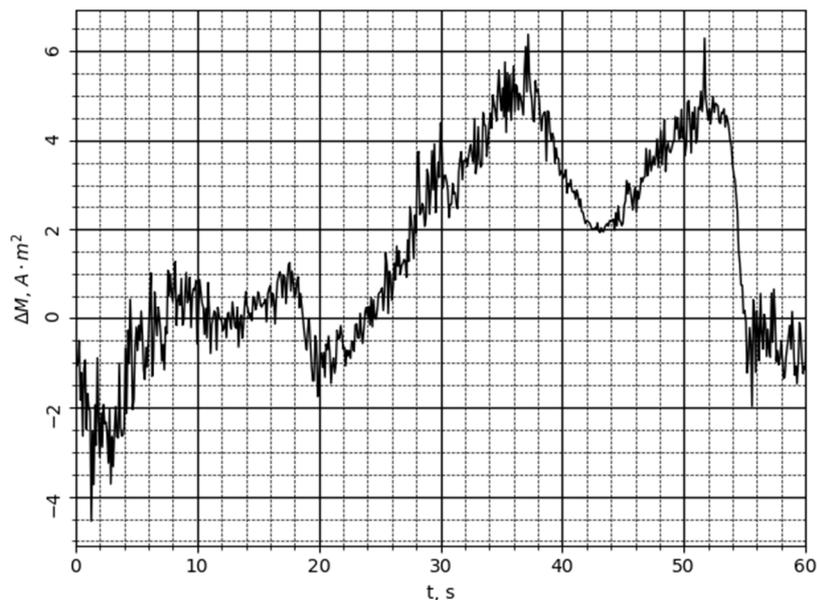


Рис. 3. Ошибка оценивания модуля ДММ

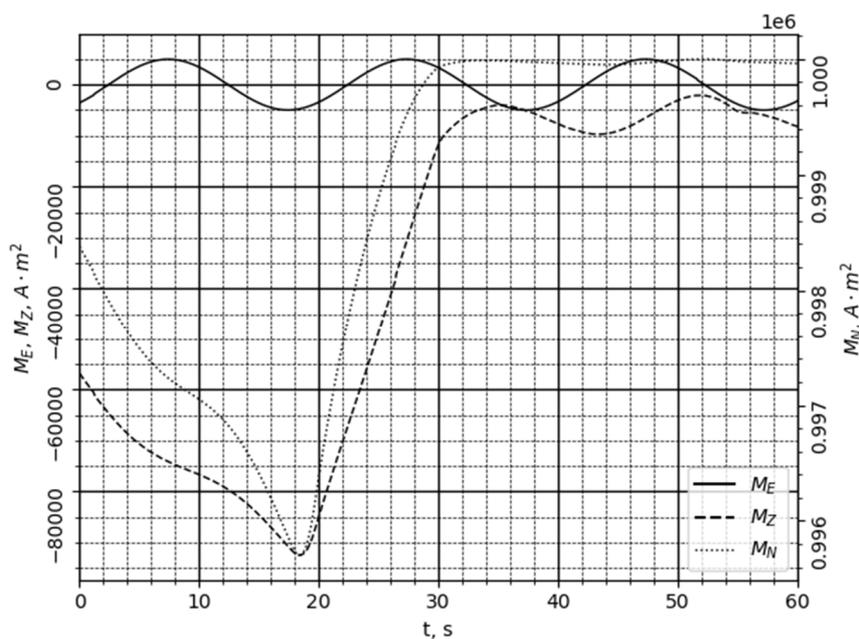


Рис. 4. Компоненты вектора ДММ

Видно, что алгоритм вычисления ДММ достаточно быстро сходится к истинному значению дипольного момента, определяемому как коэффициент при члене в разложении, убывающем как $1/r^3$.

Во втором эксперименте моделировалось оценивание ДММ с учетом помех датчиков и неточного знания геометрии измерителя, результаты приведены на рис. 5 (значение модуля ДММ такое же, как и в первом эксперименте). Видно, что по сравнению с первым экспериментом качество оценивания, как и ожидалось, ухудшилось.

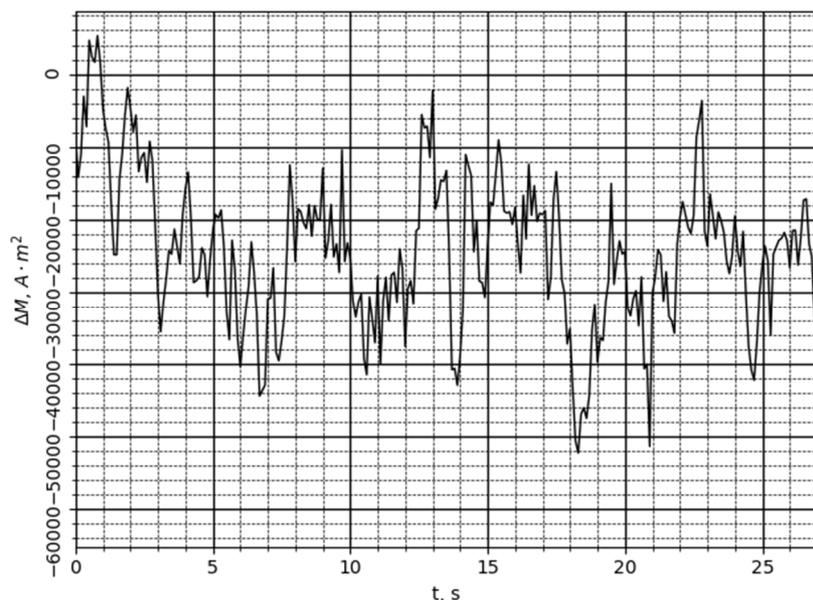


Рис. 5. Ошибка оценивания модуля ДММ

В ходе третьего эксперимента магнитное поле объекта рассчитывалось как сумма полей системы точечных диполей и однородной оболочки, результаты представлены на рис. 6 (значение модуля ДММ такое же, как и в первом эксперименте).

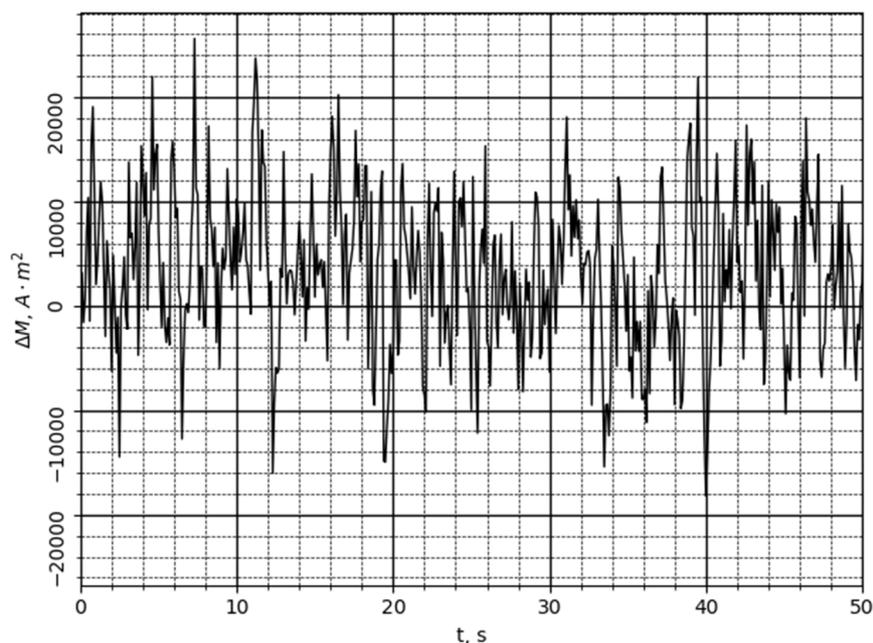


Рис. 6. Ошибка оценивания модуля ДММ

Качество оценивания ДММ хуже, чем в первом эксперименте, что объясняется как особенностями применяемого алгоритма оценивания дипольного момента, основанного на формуле для поля точечного диполя и определяющего ДММ более сложных систем лишь приближенно, так и наличием моделируемых шумов измерений. Отметим к тому же, что результаты ошибки оценок в третьем эксперименте не сильно хуже, чем во втором эксперименте, что доказывает принципиальную возможность применения рассматриваемых алгоритмов оценивания ДММ для объектов с достаточно сложной структурой собственного магнитного поля.

Заключение

В статье описан разработанный авторами имитационный макет, предназначенный для моделирования функционирования магнитоградиентного измерителя в процессе оценивания ДММ ПО. Подробно описаны: структура макета, принципы его функционирования, назначение отдельных служебных модулей, входящих в состав данного макета. Кроме того, изложены: алгоритм моделирования магнитного поля ПО, состоящего из двух составляющих (постоянной части поля, поля эллипсоидальной оболочки), алгоритм моделирования нормальной составляющей МПЗ и различных помех (индустриальной, поля аномалий, вариационной составляющей МПЗ), нелинейный алгоритм оценивания параметров ДММ по измерениям компонент вектора магнитного поля в нескольких точках с фиксированным разносом. Приведены примеры компьютерных экспериментов, выполненных с использованием макета.

Литература

1. **Noriega G.** Aeromagnetic Compensation in Gradiometry - Performance, Model Stability, and Robustness // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. Vol. 12, issue 1. P. 117-121.
2. **Bayens T.M.** Analysis of the Demagnetisation Process and Possible Alternative Magnetic Treatments for Naval Vessels / A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the School of Physics, Faculty of Science at The Un. of New South Wales. 2002. 275 p.
3. **Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю.** Применение магнито-градиентометров для управления магнитным полем подвижного объекта / Проблемы управления. 2017. № 2. С. 68-72.
4. **Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В.** Структура алгоритмов управления проводкой летательного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 217-225.
5. **Karshakov E.V., Shevchenko A.M., Garakoev A.M.** Formation of a director index to assist the pilot in conducting airborne geophysical survey // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering - International Workshop on Navigation and Motion Control (NMC 2020). 2020. Vol. 984. С. 012015 (1-10)
6. **Парселл Э.** Электричество и магнетизм: учебное руководство / пер. с англ. под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга, М.: Наука, 1983. 415 с.
7. **Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.** Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. // М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 2-е изд., 1982. 621 с.
8. **Moon P., Spencer D.E.** Field Theory Handbook // Springer-Verlag, 1988, 236p.
9. **Thebault E. et al.** International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space, 67, 79, 2015, 1-19 pp.
10. **Telford W.M., Geldart L.R. and Sherif R.E.** Applied Geophysics / Cambridge University Press, 2004. 744 p.

11. **Foley C.P., Tilbrook D.L., Leslie K.E., et al.** Geophysical Exploration Using Magnetic Gradiometry Based on HTS SQUIDs, // IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 1375–1378.
12. **Ллойд Э., Ледерман У.** Справочник по прикладной статистике. Том 2 // М.: Финансы и статистика, 1990, 526 с.
13. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации / СПб: ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электроприбор», 2003, 370 с.
14. **Simon D.** Optimal State Estimation. Kalman, H and Nonlinear Approaches // 2006, 550p.
15. **Xu Y., Chen X., Li. Q.** Adaptive Iterated Extended Kalman Filter and Its Application to Autonomous Integrated Navigation for Indoor Robot // The Scientific World Journal, 2014, Vol. 2014, 7 p.