

УДК 681.5.08

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ ФЕРРОЗОНДОВОГО МАГНИТОМЕТРА

М.М. Мурзабеков, А.Е. Ескин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия
murzabekov@vniiftri.ru
eskin@vniiftri.ru

Аннотация. Калибровка феррозондового магнитометра является неотъемлемой частью его практического применения. Общеизвестный метод калибровки магнитометра основан на его вращении вокруг каждой из осей. Он требует наличия немагнитной установки, которая позволяет вращать магнитометр по всем трём осям, и постоянного внешнего магнитного поля на время калибровки. В статье рассмотрены два алгоритма метода калибровки магнитометра на основе его вращения, представлены шумовые характеристики двух точек, выбранных для калибровки магнитометров, установка для калибровки и результаты калибровки трёх феррозондовых магнитометров.

Ключевые слова: феррозондовый магнитометр, калибровка магнитометра, магнитное поле Земли.

CALIBRATION RESULTS OF THE FLUXGATE MAGNETOMETER

M.M. Murzabekov, A.E. Eskin

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
murzabekov@vniiftri.ru
eskin@vniiftri.ru

Abstract. Calibration of a fluxgate magnetometer is an integral part of its practical application. The well-known method of calibrating a magnetometer is based on its rotation around each of the axes. It requires a non-magnetic setup that allows rotation of the magnetometer in all three axes, and a constant external magnetic field during calibration. The article considers two algorithms for the magnetometer calibration method based on its rotation, presents the noise characteristics of two points chosen for magnetometer calibration, the calibration setup and the calibration results of three fluxgate magnetometers.

Keywords: fluxgate magnetometer, magnetometer calibration, Earth's magnetic field.

Введение

Феррозондовый магнитометр имеет три ортогональные оси, которые измеряют X -, Y -, Z -компоненты магнитного поля Земли (МПЗ) независимо друг от друга. Абсолютное значение индукции МПЗ вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов показаний по каждой оси.

Измерения феррозондового магнитометра представляют собой сырые измерения, которые требуют учёта влияния ряда определяющих параметров [1–3]: 1) влияние так называемого эффекта «твёрдого железа» (hard-iron) в составе самого магнитометра, которое вызывает смещение нуля осей магнитометра;

- 2) влияние так называемого эффекта «мягкого железа» (soft-iron) в составе самого магнитометра, которое вызывает искажение показаний осей магнитометра;
- 3) неортогональность осей магнитометра между собой;
- 4) значения масштабных коэффициентов каждой оси магнитометра.

Будем их называть калибровочными параметрами.

Исходя из вышесказанного, модель измерений магнитометра можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{B} = A \cdot (\mathbf{B}' - \mathbf{V}), \quad (1)$$

где $\mathbf{B} = (X \ Y \ Z)^T$ — калиброванные измерения магнитометра; A — корректирующая матрица, которая учитывает неортогональность измерительных датчиков магнитометра между собой, масштабные коэффициенты, влияние эффекта «мягкого железа»; $\mathbf{B}' = (X' \ Y' \ Z')^T$ — необработанные (сырые) измерения магнитометра; $\mathbf{V} = (V_x \ V_y \ V_z)^T$ — смещения нуля по каждой оси магнитометра (эффект «твёрдого железа»).

Существуют различные методы калибровки феррозондовых магнитометров [4]. Наиболее известным из них является метод вращения магнитометра вокруг каждой оси в заданном постоянном магнитном поле (таким полем может служить магнитное поле Земли или искусственное магнитное поле).

Исходя из уравнения (1), количество неизвестных параметров модели калибровки равно 9: 6 неизвестных параметров корректирующей матрицы A и 3 параметра, соответствующие смещению нуля каждой оси магнитометра. При калибровке магнитометра дополнительно оценивается ещё и абсолютное значение внешнего магнитного поля в точке измерений. Итого при калибровке магнитометра обычно оцениваются 10 неизвестных параметров.

Для калибровки феррозондового магнитометра методом вращения необходимо:

- иметь немагнитную установку, которая позволяет вращать магнитометр по всем трём осям;
- обеспечить постоянное внешнее магнитное поле за время калибровки.

Рассмотрим некоторые алгоритмы калибровки магнитометра.

Алгоритмы калибровки магнитометра

Алгоритм 1

В работе [5] представлен алгоритм калибровки магнитометра, который называется «10-параметровая модель калибровки». Основное уравнение данного алгоритма можно записать в следующем виде:

$$C \cdot \beta = 0, \quad (6)$$

где C представляет собой матрицу размером $n \times 10$, где n — количество измерений магнитометра, и имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} X_1^2 & 2 \cdot X_1 \cdot Y_1 & 2 \cdot X_1 \cdot Z_1 & Y_1^2 & 2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 & Z_1^2 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2^2 & 2 \cdot X_2 \cdot Y_2 & 2 \cdot X_2 \cdot Z_2 & Y_2^2 & 2 \cdot Y_2 \cdot Z_2 & Z_2^2 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ X_n^2 & 2 \cdot X_n \cdot Y_n & 2 \cdot X_n \cdot Z_n & Y_n^2 & 2 \cdot Y_n \cdot Z_n & Z_n^2 & X_n & Y_n & Z_n & 1 \end{pmatrix},$$

где X_i, Y_i, Z_i — измеренные (сырые) значения компонент внешнего магнитного поля; β представляет собой вектор неизвестных параметров:

$$\beta = (\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4 \ \beta_5 \ \beta_6 \ \beta_7 \ \beta_8 \ \beta_9 \ \beta_{10})^T. \quad (7)$$

Неизвестные параметры калибровки магнитометра находятся на основе нахождения собственных значений и собственных векторов матрицы $C^T \cdot C$. Собственный вектор, соответствующий минимальному собственному значению $C^T \cdot C$, представляет собой вектор неизвестных параметров β .

После нахождения вектора неизвестных параметров β неизвестные параметры калибровки находятся следующим образом:

1. Находится промежуточная матрица W , которая имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \beta_2 & \beta_4 & \beta_5 \\ \beta_3 & \beta_5 & \beta_6 \end{pmatrix}.$$

2. Находятся смещения нуля по каждой оси магнитометра:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = -\left(\frac{1}{2}\right) \cdot W^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \beta_7 \\ \beta_8 \\ \beta_9 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

3. Находится корректирующая матрица A :

$$A = \sqrt{W} = Q \cdot \sqrt{\Lambda} \cdot Q^T, \quad (9)$$

где Q — 3×3 матрица с собственными векторами матрицы W ; Λ — 3×3 диагональная матрица с собственными значениями матрицы W .

4. Находится абсолютное значение T индукции внешнего магнитного поля:

$$T = \sqrt{|\beta_1 \cdot V_x^2 + 2 \cdot \beta_2 \cdot V_x \cdot V_y + 2 \cdot \beta_3 \cdot V_x \cdot V_z + \beta_4 \cdot V_y^2 + 2 \cdot \beta_5 \cdot V_y \cdot V_z + \beta_6 \cdot V_z^2 - \beta_{10}|}. \quad (10)$$

Алгоритм 2

В работе [6] представлен двухэтапный алгоритм калибровки магнитометра на основе известного алгоритма Марквардта — Левенберга (М—Л). На первом этапе происходит «подгонка» результатов измерений под сферу и находится радиус сферы (абсолютное значение внешнего магнитного поля) и приближённые значения смещения нуля по каждой оси. На втором этапе происходит «подгонка» результатов измерений, с учётом данных на первом этапе, под эллипсоид, в результате которого оценивается корректирующая матрица A и уточнённые значения смещения нуля по каждой оси магнитометра.

Рассмотрим более подробно этот алгоритм.

Этап 1 данного алгоритма подразумевает минимизацию следующей целевой функции:

$$E_1 = \sum_{i=1}^N [R - f(\mathbf{B}_i, \mathbf{V})]^2 = \sum_{i=1}^N [F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X})]^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где R — радиус сферы (абсолютное значение индукции внешнего магнитного поля); $\mathbf{V} = (V_X \ V_Y \ V_Z)$ — смещения нуля по осям магнитометра; $\mathbf{B}_i = (X_i \ Y_i \ Z_i)$ — измеренные компоненты внешнего магнитного поля; N — количество измерений; $\mathbf{X} = (R \ V_X \ V_Y \ V_Z)$ — вектор неизвестных параметров.

В начале итерационного процесса задаются приближённые значения неизвестных параметров $\mathbf{X}$, и процесс итерации продолжается до выполнения условия:

$$|\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k| < \varepsilon,$$

где k — номер итерации ($k = 0, \dots, n$); $\varepsilon \leq 10^{-6}$ — точность решения.

Итерационный процесс алгоритма М—Л выглядит следующим образом:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - \left[J_k^T \cdot J_k + \alpha_k \cdot \text{diag}(J_k^T \cdot J_k) \right]^{-1} \cdot J_k^T \cdot F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X}_k), \quad (12)$$

где α_k — параметр итерации; J_k — матрица Якоби для k -й итерации:

$$J = \frac{\partial F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}},$$

$$F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X}) = R - \left\| X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 + 2 \cdot X_i \cdot V_X + 2 \cdot Y_i \cdot V_Y + 2 \cdot Z_i \cdot V_Z + V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2 \right\|^{\frac{1}{2}},$$

$$a_i = \left\| X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 + 2 \cdot X_i \cdot V_X + 2 \cdot Y_i \cdot V_Y + 2 \cdot Z_i \cdot V_Z + V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2 \right\|^{\frac{1}{2}},$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X})}{\partial R} = 1,$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X})}{\partial V_X} = -\frac{X_i - V_X}{a_i},$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X})}{\partial V_Y} = -\frac{Y_i - V_Y}{a_i},$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{B}_i, \mathbf{X})}{\partial V_Z} = -\frac{Z_i - V_Z}{a_i},$$

$$J_k = \left[1 - \frac{X_i - V_X}{a_i} - \frac{Y_i - V_Y}{a_i} - \frac{Z_i - V_Z}{a_i} \right],$$

где $i = 1, \dots, N$ — количество измерений.

На втором этапе происходит «подгонка» результатов измерений по эллипсоид с учётом результатов первого этапа:

$$E_2 = \sum_{i=1}^N [R - f(\mathbf{B}_i, \gamma)]^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $\gamma = [a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{33} \ V_X \ V_Y \ V_Z]$ — вектор неизвестных параметров; a_{ij} — коэффициенты корректирующей матрицы A ; R — радиус сферы, полученной на первом этапе; $f(\mathbf{B}_i, \gamma)$ — выражение эллипсоида:

$$f(\mathbf{B}, \gamma) = \left\| \mathbf{B}^T \cdot A^T \cdot A \cdot \mathbf{B} + 2 \cdot \mathbf{B}^T \cdot A^T \cdot \mathbf{V} + \mathbf{V}^T \cdot A^T \cdot A \cdot \mathbf{V} \right\|^{\frac{1}{2}},$$

где A — корректирующая матрица:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}.$$

Введём промежуточные переменные:

$$\begin{aligned} D_i &= a_{11} \cdot (X_i + V_X) + a_{12} \cdot (Y_i + V_Y) + a_{13} \cdot (Z_i + V_Z); \\ B_i &= a_{12} \cdot (X_i + V_X) + a_{22} \cdot (Y_i + V_Y) + a_{23} \cdot (Z_i + V_Z); \\ C_i &= a_{13} \cdot (X_i + V_X) + a_{23} \cdot (Y_i + V_Y) + a_{33} \cdot (Z_i + V_Z); \\ b_i &= \|A \cdot (\mathbf{B}_i + \mathbf{V})\|. \end{aligned}$$

Выражения для матриц Якоби по каждому неизвестному параметру имеют вид:

$$\begin{aligned} J^1 &= \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial a_{11}} = -\frac{(X_i + V_X) \cdot D_i}{b_i}; \\ J^2 &= \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial a_{22}} = -\frac{(Y_i + V_Y) \cdot B_i}{b_i}; \\ J^3 &= \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial a_{33}} = -\frac{(Z_i + V_Z) \cdot C_i}{b_i}; \\ J^4 &= \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial a_{12}} = -\frac{(Y_i + V_Y) \cdot D_i + (X_i + V_X) \cdot B_i}{b_i}; \\ J^5 &= \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial a_{13}} = -\frac{(Z_i + V_Z) \cdot D_i + (X_i + V_X) \cdot C_i}{b_i}; \\ J^6 &= \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial a_{23}} = -\frac{(Z_i + V_Z) \cdot B_i + (Y_i + V_Y) \cdot C_i}{b_i}, \end{aligned}$$

$$J^7 = \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial V_X} = - \frac{a_{11} \cdot (X_i + V_X) + a_{12} \cdot (Y_i + V_Y) + a_{13} \cdot (Z_i + V_Z)}{b_i},$$

$$J^8 = \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial V_Y} = - \frac{a_{12} \cdot (X_i + V_X) + a_{22} \cdot (Y_i + V_Y) + a_{23} \cdot (Z_i + V_Z)}{b_i},$$

$$J^9 = \frac{\partial f(\mathbf{B}_i, \gamma)}{\partial V_Z} = - \frac{a_{13} \cdot (X_i + V_X) + a_{23} \cdot (Y_i + V_Y) + a_{33} \cdot (Z_i + V_Z)}{b_i}.$$

Итоговое выражение для матрицы Якоби для k -й итерации имеет вид:

$$J_k = [J^1 J^2 J^3 J^4 J^5 J^6 J^7 J^8 J^9].$$

Итерационный процесс алгоритма М—Л для нахождения неизвестных параметров выглядит следующим образом:

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \left[J_k^T \cdot J_k + \alpha_k \cdot \text{diag}(J_k^T \cdot J_k) \right]^{-1} \cdot J_k^T \cdot F(\mathbf{B}_i, \gamma_k). \quad (14)$$

В начале итерационного процесса задаются приближённые значения неизвестных параметров, и процесс итерации продолжается до выполнения условия:

$$|\gamma_{k+1} - \gamma_k| < \varepsilon.$$

Условия калибровки магнитометра

Как отмечено выше, для калибровки магнитометра необходимо обеспечить постоянное внешнее магнитное поле за время калибровки. Если в качестве магнитного поля использовать МПЗ, необходимо выбрать точку вдалеке от автомобильных дорог, промышленных зданий и т.п. Тут сразу следует отметить, что такой подход обладает некоторыми недостатками:

- возможное в ближайшем будущем строительство рядом с данной точкой промышленных объектов, автомобильных дорог, ЛЭП и т.п.;
- зависимость времени калибровки от погодных условий.

Есть альтернативный метод создания постоянного внешнего магнитного поля в лабораторных условиях. Этот метод заключается в использовании магнитной меры из колец Гельмгольца. Как известно, кольца Гельмгольца позволяют получить однородное магнитное поле.

В настоящей работе в качестве внешнего магнитного поля использовалось МПЗ. Для калибровки магнитометров были выбраны две точки:

- точка 1 («Пруд») расположена на территории института за промышленными зданиями в небольшом поле. Она располагается в открытом месте, на расстоянии не менее 120 м от зданий и автомобильных дорог;
- точка 2 («Лес») расположена за территорией института в лесопарке на расстоянии не менее 100 м от просёлочных малозагруженных автомобильных дорог и не менее 1 км от населённых пунктов.

В обеих точках выполнены измерения шумов. Под шумами здесь понимается разброс показаний магнитометра в стационарном состоянии за время, соответствующее времени калибровки магнитометра при той же частоте измерений. Примеры шумов для обеих точек измерений представлены на рис. 1.

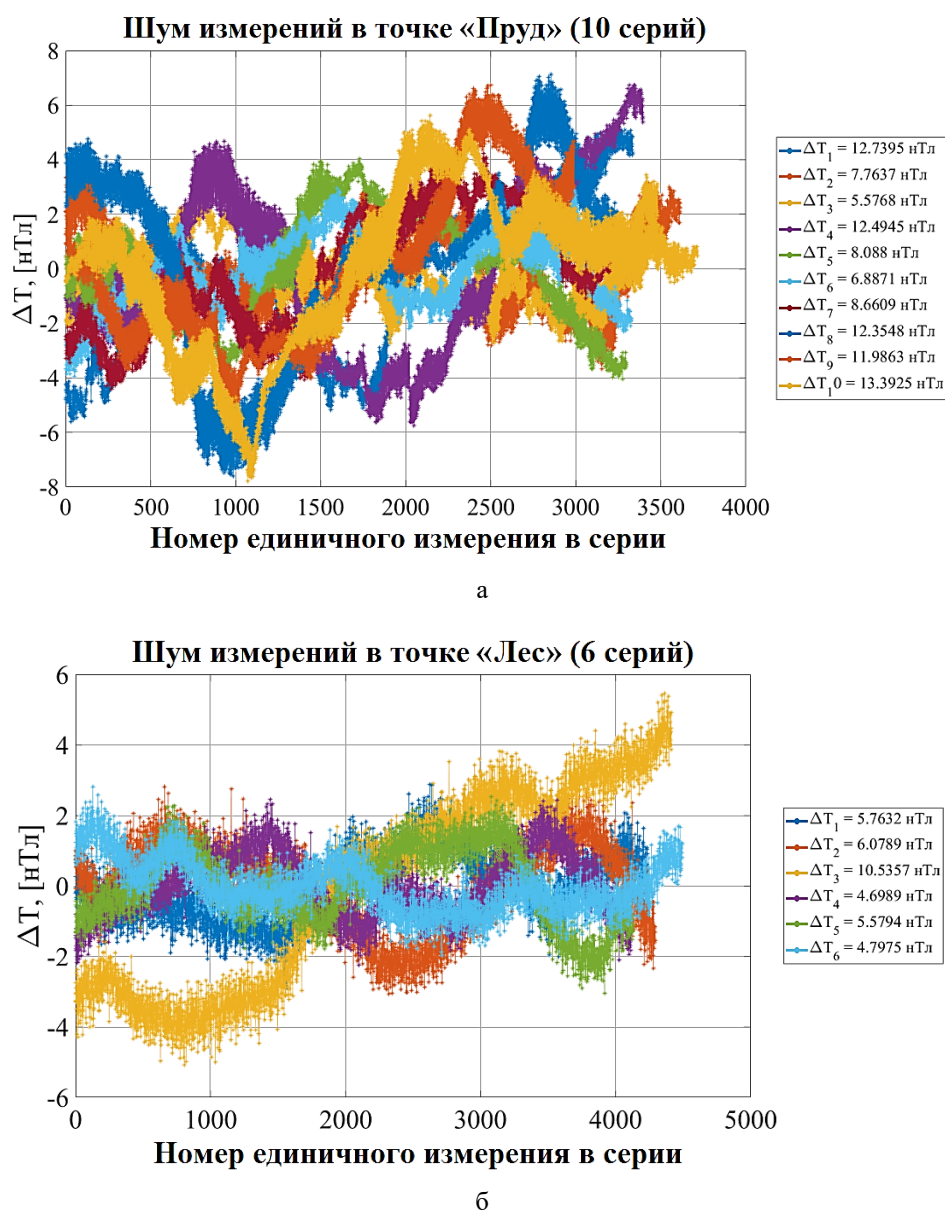


Рис. 1. Примеры измерений шумов в точке: а — «Пруд»; б — «Лес»

Как видно из рис. 1, шум измерений в точке «Пруд» находится в пределах 6–14 нТл, а в точке «Лес» — 5–10 нТл.

Рассмотрим пример калибровки магнитометра на этих двух точках. Перед процессом калибровки магнитометра через сайт магнитной обсерватории «Москва» контролировался индекс геомагнитной активности (K -индекс) на наличие магнитных бурь [7].

Магнитометрическая калибровочная установка

Для вращения магнитометра вокруг осей с целью его калибровки разработана магнитометрическая калибровочная установка на примере монтировки от телескопа Meade LX200 (рис. 2).

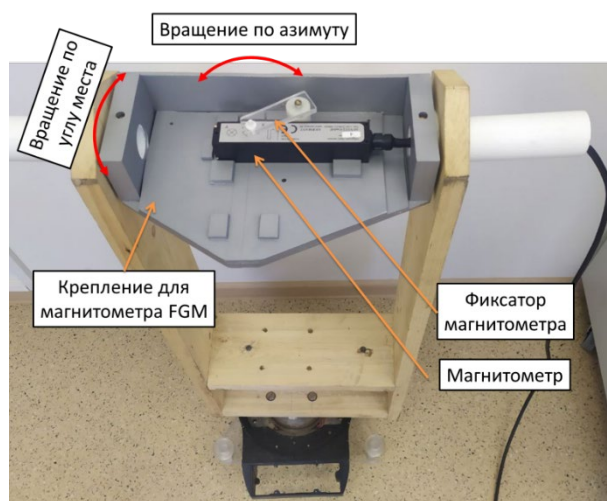


Рис. 2. Магнитометрическая калибровочная установка (с креплением для магнитометра FGM3D)

Калибровочная установка имеет два положения для размещения магнитометра (рис. 3). В каждом положении магнитометр фиксируется с помощью специального фиксатора.

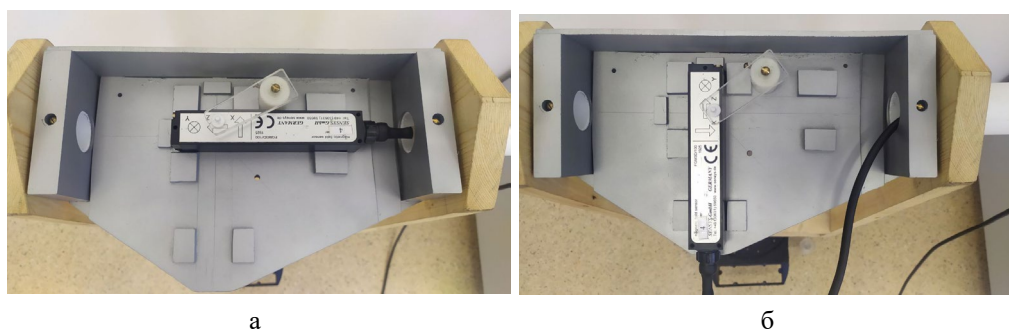


Рис. 3. Размещение магнитометра при его вращении на примере магнитометра FGM3D: а — положение 1; б — положение 2

Вращение магнитометра осуществляется вручную. При этом в процессе калибровки происходит одновременное вращение магнитометра и по углу места и по азимуту в каждом положении. При этом на одно вращение магнитометра по азимуту от 0° до 360° выполняются 4–5 вращений магнитометра по углу места от 0° до 360° .

Алгоритм калибровки магнитометра следующий.

Положение 1. Магнитометр размещается в положении 1, и происходит его вращение вокруг первой оси. В данном положении магнитометр вращается по углу места по оси OZ (см. рис. 3а).

Положение 2. Магнитометр размещается в положении 2, и происходит его вращение вокруг второй оси. Если вращать магнитометр, как показано на рис. 3б, вращение по углу места будет вокруг оси OX . Для вращения магнитометра вокруг третьей оси OY выполняется его поворот на 90° вокруг оси OZ .

Результаты калибровки магнитометра

Общие сведения

С использованием вышеописанной монтровки была выполнена калибровка двух феррозондовых магнитометров FGM3D/100 под номерами 1925 и 1926 и одного феррозондового магнитометра DM-050 в точках «Пруд» и «Лес». Сразу следует отметить, что сравнение рассмотренных выше алгоритмов калибровки дало следующие результаты: разность по V_x , V_y , V_z , T не превышает 0,1 нТл, а разность коэффициентов корректирующей матрицы A составляет 10^{-4} и менее. В дальнейшем, так как алгоритм 1 является более быстроедействующим, вычисления выполнены с его использованием.

Во время проведения калибровки магнитометров индекс геомагнитной активности не превышал 2, т.е. МПЗ было спокойным. Сам процесс калибровки занимает не более 1,5 мин., поэтому вариацией МПЗ можно пренебречь.

Калибровка магнитометра в магнитном поле Земли

Результаты калибровки магнитометров FGM3D

На рис. 4 представлен пример калибровки магнитометра FGM3D под номером 1926 в точках «Пруд» и «Лес» ($\Delta T_{\text{изм}}$ — максимальный разброс измеренных значений индукции МПЗ; $\Delta T_{\text{калиб}}$ — максимальный разброс измеренных значений индукции МПЗ после учёта калибровочных параметров).

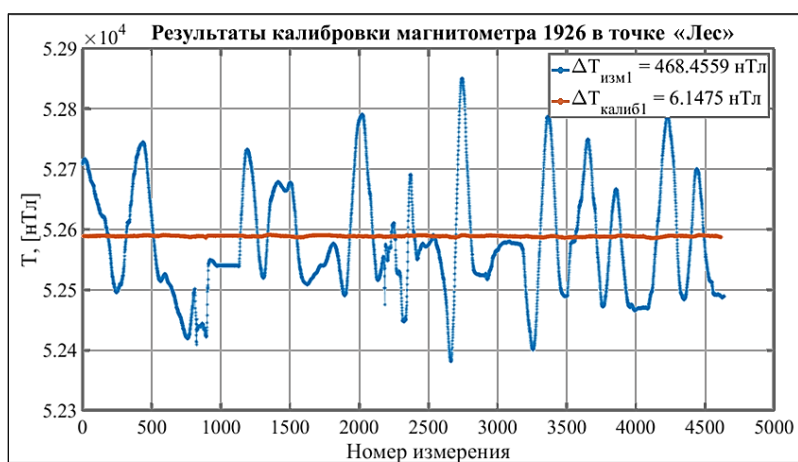
В таблице 1 представлены результаты калибровки магнитометров 1925 и 1926, а именно:

- максимальный разброс измеренных значений индукции МПЗ;
- максимальный разброс измеренных значений индукции МПЗ после учёта калибровочных параметров;
- смещения нуля по каждой оси магнитометра.

Сравнение коэффициентов корректирующей матрицы показало, что её коэффициенты для точек «Пруд» и «Лес» отличаются менее чем на 10^{-3} .



а



б

Рис. 4. Пример калибровки магнитометра FGM3D/100 под номером 1926 в точке:
а — «Пруд»; б — «Лес»

Таблица 1

Результаты калибровки магнитометров 1925 и 1926

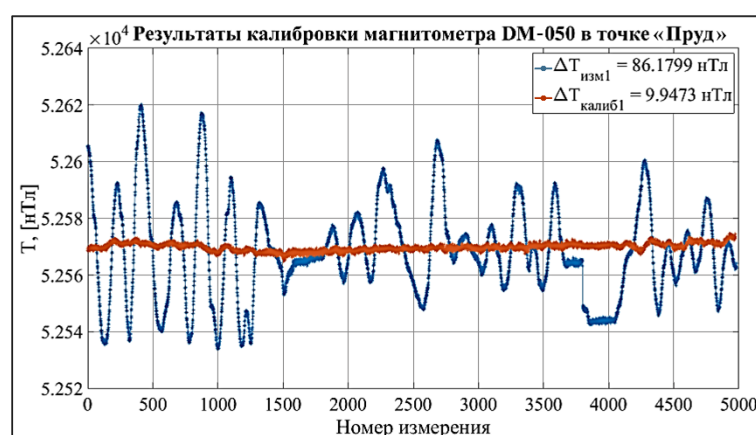
Параметр	Магнитометр 1925		Магнитометр 1926	
	точка «Пруд»	точка «Лес»	точка «Пруд»	точка «Лес»
$\Delta T_{\text{изм}}, \text{нТл}$	299,38	301,04	526,31	468,46
$\Delta T_{\text{калиб}}, \text{нТл}$	9,78	7,14	9,41	6,15
$V_X, \text{нТл}$	-27,97	-28,89	+18,08	+20,67
$V_Y, \text{нТл}$	+39,78	+38,53	-6,77	-6,30
$V_Z, \text{нТл}$	+13,07	+12,47	+51,92	+49,34

Анализ таблицы 1 показывает, что:

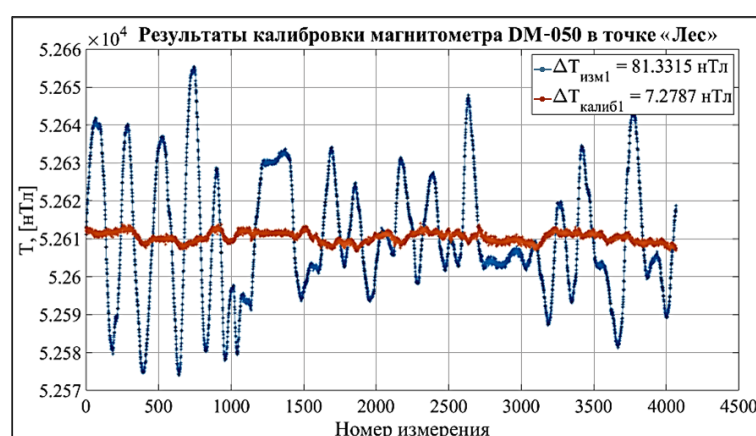
- разброс калиброванных значений показаний магнитометра существенно уменьшается относительно разброса измеренных значений (более чем в 30 раз);
- разброс калиброванных значений показаний магнитометра в точке «Лес» меньше, чем в точке «Пруд». Данное обстоятельство обусловлено, скорее всего, особенностью месторасположения точки «Лес»;
- для обеих точек результаты смещения нуля по каждой оси магнитометров отличаются менее чем на 2 нТл.

Результаты калибровки магнитометра DM-050

На рис. 5 представлены примеры калибровок магнитометра DM-050 в точках «Пруд» и «Лес».



а



б

Рис. 5. Пример калибровки магнитометров DM-050 в точке: а — «Пруд»; б — «Лес»

В таблице 2 представлены результаты калибровки магнитометра DM-050.

Таблица 2

Результаты калибровки магнитометра DM-050

Параметр	Магнитометр DM-050	
	Точка «Пруд»	Точка «Лес»
$\Delta T_{\text{изм}}$, нТл	86,18	81,33
$\Delta T_{\text{калиб}}$, нТл	9,95	7,28
V_X , нТл	-5,92	-4,98
V_Y , нТл	+4,06	+5,44
V_Z , нТл	-4,99	-5,68

Анализ таблицы 2 показывает, что:

- разброс калиброванных значений показаний магнитометра существенно уменьшается относительно разброса измеренных значений (более чем в 9 раз);
- разброс калиброванных значений показаний магнитометра в точке «Лес» меньше, чем в точке «Пруд». Данное обстоятельство обусловлено, скорее всего, особенностью месторасположения точки «Лес»;
- для обеих точек результаты смещения нуля по каждой оси магнитометров отличаются менее чем на 2 нТл;
- разброс измеренных значений показаний магнитометра DM-050 существенно меньше, чем для магнитометров FGM3D. Данное обстоятельство обусловлено, скорее всего, тем, что неортогональность осей у магнитометра DM-050 не превышает $\pm 0,01^\circ$, в то время как для магнитометров FGM3D этот показатель $\leq \pm 0,5^\circ$.

Заключение

Таким образом:

- разработана установка для калибровки феррозондовых магнитометров, позволяющая вращать магнитометр вокруг каждой оси;
- проведена калибровка трёх феррозондовых магнитометров в двух пространственных точках. Результаты калибровки показали хорошую сходимость калибровочных параметров: смещения нуля по каждой оси магнитометров отличаются менее чем на 2 нТл, а коэффициенты корректирующей матрицы — менее чем на 10^{-3} ;
- результаты сравнения двух известных алгоритмов калибровки показали их пренебрежимо малое отличие.

В дальнейшем планируется проведение сравнения результатов калибровки вышеупомянутых феррозондовых магнитометров, полученных методом вращения, с результатами метрологической калибровки с использованием Государственного рабочего эталона единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля 1 разряда.

Список литературы

1. Акимов И.О., Илюхин С.Н., Ивлев Н.А., Колосов Г.Е. Методика калибровки магнитометра на этапе наземной диагностики систем космического аппарата // Инженерный журнал: наука и инновации: электронное научно-техническое издание. — 2018. — № 5 (77). — DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1762.
2. Ivanov D.S., Tkachev S.S., Karpenko S.O., Ovchinnikov M.Yu. Kalibrovka datchikov dlya opredeleniya orientatsii malogo kosmicheskogo apparata [Sensor calibration for determining attitude of a small spacecraft] // Preprinty IPM RAN [Keldysh Institute Preprints]. — 2010. — No. 28. — P. 30.
3. Ozyagcilar T. Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft-iron Interference. — Freescale Semiconductor Ltd. 1992. — P. 1–17.
4. Zongkai Wu, Wei Wang. Magnetometer and Gyroscope Calibration Method with Level Rotation // Sensors. — 2018. — 18. — 748.
5. Pedley M., Stanley M. Magnetic Calibration. Technical Note. Document TBD. Version: Draft. — September, 2014.
6. Helong Wu, Xinbiao Pei, Jihui Li, Huibin Gao and Yue Bai. An improved magnetometer calibration and compensation method based on Levenberg–Marquardt algorithm for multi-rotor unmanned aerial vehicle // Measurement and Control. — 2020. — V. 53 (3–4). — P. 276–286.
7. Данные наблюдений, модели, прогнозы // Измиран: [сайт]. — URL: <https://izmiran.ru/data/> (дата обращения: 08.06.2022).

Статья поступила в редакцию: 30.06.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 22.07.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.