

Методика калибровки магнитометра на этапе наземной диагностики систем космического аппарата

© И.О. Акимов^{1,2}, С.Н. Илюхин², Н.А. Ивлев¹, Г.Е. Колосов²

¹ООО «Спутник», Москва, 121059, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Изложены эмпирические методики температурной калибровки и учета основных погрешностей магнитометров, используемых в бортовых измерительных комплексах современных космических аппаратов. Разработана математическая модель измерений магнитометра, учитывающая текущие ошибки измерений, дана геометрическая интерпретация погрешностей. Приведена зависимость показаний типовых магниточувствительных датчиков от температуры окружающей среды. Для обеспечения точности работы прибора в различных температурных условиях сформирована методика температурной калибровки его показаний. Представлены подход к определению матрицы перехода между системами координат магнитометра, позволяющей исключить погрешности позиционирования чувствительных элементов при сборке магнитометра, а также апробированные на профилирующем предприятии алгоритмы проведения стендовых исследований для получения данных, необходимых для реализации рассмотренных методик. На основе разработанных методик выполнена калибровка магнитометра и приведены соответствующие результаты.

Ключевые слова: магнитометр, температурная калибровка, обработка измерений, магнитное поле

Введение. Система управления космического аппарата (КА) является сложной многоуровневой системой, в состав которой входит комплекс измерительной аппаратуры. Для обеспечения надежного и точного функционирования системы ориентации КА в полете необходимо на предварительных этапах провести наземную и предпусковую подготовку, включающую в себя калибровку датчиков определения углового положения, а также стендовые испытания датчиков на макете системы управления и специальную диагностику [1].

У каждого датчика системы ориентации есть набор характеристик, которые необходимо знать для определения ориентации аппарата. Для различных типов датчиков эти характеристики разные, но датчики одного вида имеют одинаковый набор характеристик.

Магнитометр — один из основных элементов системы ориентации и стабилизации многих искусственных спутников Земли (ИСЗ). Данный прибор измеряет величину и направление вектора магнитной индукции геомагнитного поля, информация о котором используется непосредственно в контуре системы ориентации в качестве ориентира. Информацию о геомагнитном поле также можно применять для пассивной или полупассивной стабилизации намагниченного ИСЗ [1–4].

Качество измерений магнитометра зависит от многих параметров: наличия магнитных элементов, смещения нуля, масштабирования измерений датчиков, неортогональности установки чувствительных элементов, случайных шумов и пр. [5]. Кроме того, при изменении температуры изменяется и сопротивление магнитометра, вследствие чего при постоянном внешнем магнитном поле показания магнитометра будут непостоянными. Следует отметить, что даже частичный учет этих параметров позволяет увеличить точность как отдельного магнитометра, так и системы ориентации и стабилизации в целом [6, 7].

Формирование методологической основы процессов калибровки высокоточных измерительных приборов, к которым относятся магнитометры, является актуальной задачей вследствие повышения требований к эффективности использования данной аппаратуры, а соответственно, и точности бортовых систем современных КА. Существующие аналитические подходы к повышению точности работы магнитометров оказываются либо весьма громоздкими, либо недостаточно универсальными, поскольку основаны на частных случаях аппаратной реализации [6].

В связи с этим цель настоящей работы — формирование новой методики определения в процессе наземной диагностики и калибровки характеристик, обеспечивающих наиболее точную работу измерительных приборов данного класса.

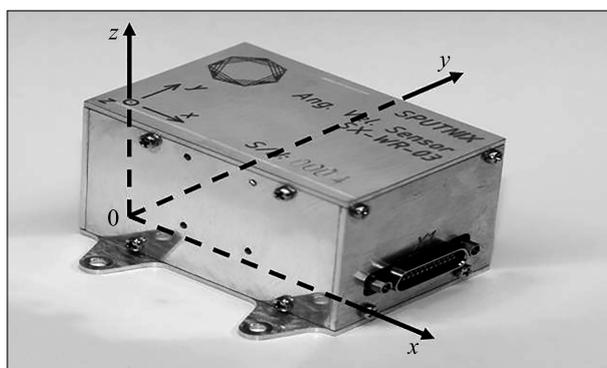


Рис. 1. Магнитометр VMS ($0xyz$ — БСК, связанная с корпусом магнитометра)

В качестве натурального образца использовали трехосный магнитометр VMS с магниточувствительными датчиками НМС 1001 (рис. 1). Для данного прибора необходимо получить калибровочные коэффициенты и определить следующие зависимости и значения [7, 8]:

- матрицу, учитывающую влияние паразитного внешнего магнитного поля, масштабирование, неортогональность чувствительных элементов;

- зависимость смещения нуля магнитометра от температуры (подобрать аппроксимирующую кривую);
- матрицу, учитывающую несовпадения осей измерительной системы координат (ИСК) прибора *OXYZ* (связанной непосредственно с расположением чувствительных элементов) и базовой системы координат (БСК), связанной с корпусом прибора.

Математическая модель работы магнитометра с коррекцией измерений. Магнитометр состоит из трех чувствительных элементов, которые ориентированы по осям ИСК с некоторой погрешностью. С учетом ошибок в общем виде модель работы трехосного магнитометра в ИСК можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{B}_i = T(\mathbf{m}_i - \mathbf{b} - \mathbf{n}_i) - \boldsymbol{\beta}(t), \quad (1)$$

где \mathbf{B}_i — вектор магнитной индукции в ИСК (измеряемая величина); T — корректирующая матрица, учитывающая влияние внешнего паразитного магнитного поля, масштабирование, неортогональность; \mathbf{m}_i — вектор первоначальных показаний магнитометра (необработанные измерения); \mathbf{b} — смещение нуля, вызываемое нетемпературными факторами; \mathbf{n}_i — шумы измерений датчика; i — номер измерения [7]; $\boldsymbol{\beta}(t)$ — вектор смещения нуля (в единицах выходных значений магнитометра) в зависимости от температуры; t — температура окружающей среды по измерениям магнитометра (в единицах выходных значений датчика).

Принимая, что \mathbf{M}_i — вектор измерений магнитометра без учета температурной компенсации, данный вектор можно записать в виде

$$\mathbf{M}_i = T^{-1}\mathbf{B}_i + \mathbf{b} + \mathbf{n}_i.$$

Для того чтобы найти корректирующую матрицу T и смещение нуля \mathbf{b} , необходимо собрать как можно больше показаний магнитометра при его различной ориентации под воздействием постоянного по величине и направлению внешнего магнитного поля неизвестного направления и величины. При этом начало БСК должно максимально совпадать с центром вращения магнитометра. Если построить полученный массив геометрических мест концов векторов измерений магнитометра \mathbf{M}_i в системе координат самого магнитометра, то радиус-вектор измерений при этом опишет эллипсоид (рис. 2).

Поскольку внешнее магнитное поле постоянно, геометрические места концов радиус-векторов \mathbf{B}_i внешнего магнитного поля в проекциях на ИСК в действительности описывают идеальную сферу (рис. 3).

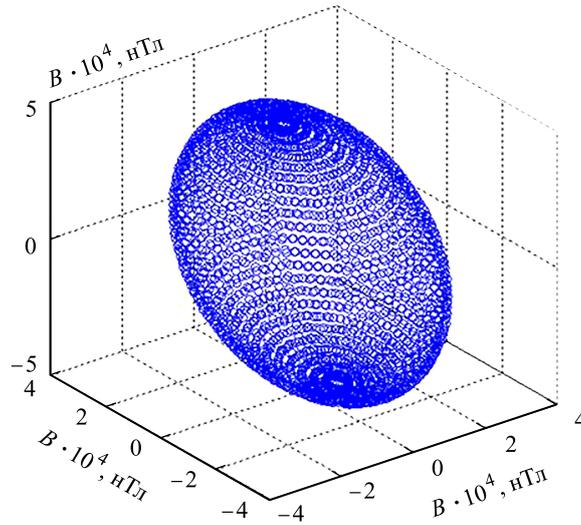


Рис. 2. Массив геометрических мест концов векторов измерений магнитометра в проекциях на оси ИСК

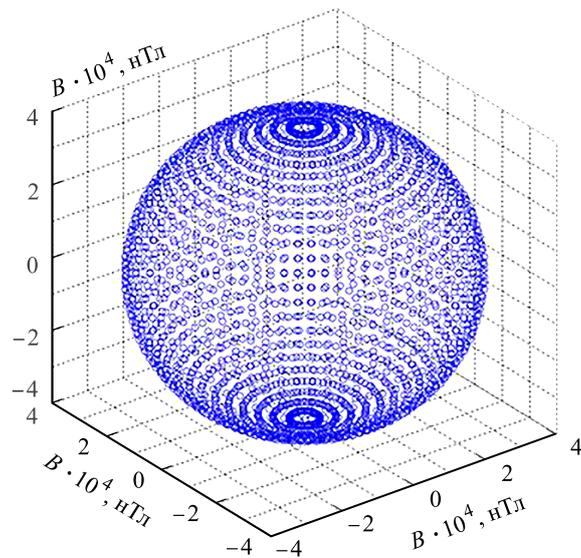


Рис. 3. Массив геометрических мест концов радиус-векторов внешнего постоянного магнитного поля в проекциях на оси ИСК

Величина и направление внешнего магнитного поля неизвестны, поскольку проводятся лишь относительные измерения. В общем случае для системы ориентации и стабилизации величина поля не имеет принципиального значения, поскольку показания нормируются. Однако при решении некоторых специальных задач количественные данные о внешнем магнитном поле являются важной составляющей массива измерительной информации.

Модуль вектора индукции внешнего магнитного поля можно получить с помощью специальной модели магнитного поля, но этот вариант не подходит для лабораторных исследований, поскольку возле поверхности Земли такая модель неточна. Этот вариант можно использовать для дополнительной калибровки в условиях космического полета. Однако необходимо учитывать, что в течение эксперимента при полете на орбите магнитное поле изменяет величину и направление, что усложняет процедуру калибровки с математической точки зрения. Вместо этого можно использовать показания калиброванного по величине магнитного поля прибора либо же поместить магнитометр в заведомо известное магнитное поле.

В данной работе предлагается проводить оценку модуля вектора магнитной индукции поля, определив среднеарифметическое значение модулей вектора измерений магнитометра:

$$B_{\text{mod}} = \frac{\sum_{i=1}^n \|\mathbf{M}_i\|}{n}.$$

Поиск матрицы T и смещения нуля \mathbf{b} будем проводить с помощью метода Ньютона — Гаусса [9]. Минимизируемый функционал примет следующий вид [10]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\|T(\mathbf{B}_{Ti} - \mathbf{b}_{Ti})\| - 1}{\sigma_m} \right)^2, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_{Ti} = \frac{\mathbf{B}_i}{B_{\text{mod}}}$; $\mathbf{b}_{Ti} = \frac{\mathbf{b}_i}{B_{\text{mod}}}$; σ_m — среднеквадратичное отклонение измерений магнитометра; i — номер измерения.

Градиент минимизируемого функционала в этом случае может быть представлен следующим образом [10]:

$$\nabla f|_x = \begin{bmatrix} \nabla f|_T \\ \nabla f|_b \end{bmatrix}, \quad (3)$$

при этом

$$\nabla f|_T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{2c_T}{\sigma_m^2} \mathbf{u}_i \otimes T\mathbf{u}_i \right);$$

$$\nabla f|_b = \sum_{i=1}^n \left(\frac{-2c_T}{\sigma_m^2} T'\mathbf{u}_i \right),$$

где $\mathbf{u}_i = (\mathbf{B}_{Ti} - \mathbf{b}_{Ti})$; $c_T = 1 - \|T\mathbf{u}_i\|^{-1}$; \otimes — произведение Кронекера [11].

Данные векторы частных производных получают через аналитические зависимости, а гессиан (матрица вторых частных производных) представлен в виде

$$\nabla^2 f|_x = \begin{bmatrix} H_{T,T} & H_{T,b} \\ H'_{T,b} & H_{b,b} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь

$$H_{T,T} = \sum_{i=1}^n \frac{2}{\sigma_m^2} \left(\frac{(\mathbf{u}_i \mathbf{u}_i') \otimes (T \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i' T')}{\|T \mathbf{u}_i\|^3} + c_T [(\mathbf{u}_i \mathbf{u}_i') \otimes E] \right);$$

$$H_{T,b} = \sum_{i=1}^n \frac{-2}{\sigma_m^2} \left(\frac{(\mathbf{u}_i \otimes T \mathbf{u}_i) \mathbf{u}_i' T' T}{\|T \mathbf{u}_i\|^3} + c_T [\mathbf{u}_i \otimes T + E \otimes T \mathbf{u}_i] \right);$$

$$H_{b,b} = \sum_{i=1}^n \frac{2}{\sigma_m^2} \left(\frac{T' T \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i' T' T}{\|T \mathbf{u}_i\|^3} + c_T T' T \right).$$

В этом случае матрицы вторых частных производных, из которых состоит гессиан, также получают аналитически [10].

Тогда итерационная формула примет вид

$$\nabla f|_{x_{i+1}} = \nabla f|_{x_i} - (\nabla^2 f|_{x_i})^{-1} \nabla f|_{x_i}. \quad (5)$$

Термозависимость работы магнитометра. При изменении температуры окружающей среды изменяется сопротивление магнитометра, вследствие чего при постоянном внешнем магнитном поле показания магнитометра начинают искажаться. Температурная коррекция позволяет избежать этого эффекта.

Ранее в ряде предприятий, в том числе в ООО «Спутникс», использовался метод, при котором для каждой из координатных осей вводили постоянный корректирующий коэффициент, что несколько некорректно, поскольку при различных ориентациях прибора отклонения его показаний будут разными.

Проведем ряд экспериментов, при которых внешнее магнитное поле будет постоянным во времени, но разным в пространстве. Поместим прибор в различные точки этого поля и будем изменять температуру, измеряя модуль вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля (рис. 4). Каждая прямая на рис. 4 соответствует одному эксперименту, проведенному в заданной точке магнитного поля при постоянном внешнем магнитном поле.

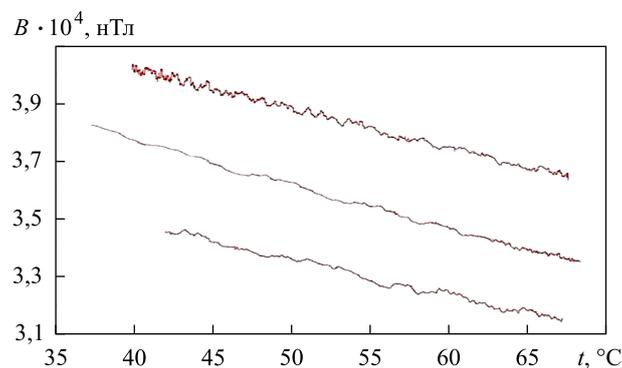


Рис. 4. Зависимость модуля вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля от температуры в трех разных точках

Экспериментально установлено, что при постоянном внешнем магнитном поле зависимость модуля магнитной индукции от температуры имеет линейный характер:

$$B = kt + c, \quad (7)$$

где k — коэффициент; t — температура; c — некоторая константа.

Согласно данным на рис. 4, полученные прямые взаимно параллельны, следовательно, коэффициент k у них одинаков и может быть определен экспериментально. Отметим, что данный коэффициент зависит от конструктивных особенностей каждого датчика и для другого прибора может отличаться.

Зададим температуру t_0 , при которой будем считать показания магнитометра верными и относительно которой будет проводиться калибровка. Именно при данной температуре можно привести получаемые показания магнитометра при постоянной температуре t_0 к заданным значениям внешнего магнитного поля. Температуру, при которой прямая, описывающая изменение модуля вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля (7), пересечет ось абсцисс, обозначим t_z (рис. 5).

Зная показания магнитометра модуля вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля B_0 при температуре t_0 , можно определить температуру t_z :

$$t_z = t_0 - \frac{B_0}{k}. \quad (8)$$

При температуре t_z модуль вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля будет равен нулю, т. е.

$$B(t_z) = \sqrt{B_x(t_z)^2 + B_y(t_z)^2 + B_z(t_z)^2} = 0. \quad (9)$$

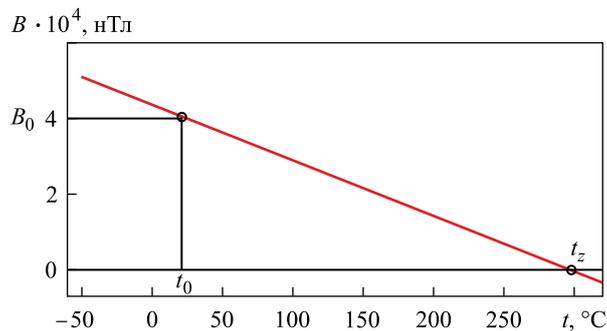


Рис. 5. Зависимость модуля вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля от температуры

Из формулы (8) следует, что при температуре t_z B_x , B_y , B_z равны нулю. Зная показания магнитометра по трем осям при температуре t_0 B_{x0} , B_{y0} , B_{z0} , можно получить уравнения прямой, характеризующей температурную зависимость для каждой из осей прибора:

$$\begin{aligned} B_x &= k_x t + c_x; \\ B_y &= k_y t + c_y; \\ B_z &= k_z t + c_z. \end{aligned}$$

Здесь B_x , B_y , B_z — показания магнитометра в ИСК при температуре t ; k_x , k_y , k_z и c_x , c_y , c_z — коэффициенты прямых, описывающих температурные зависимости соответственно для каждой из осей магнитометра.

Далее рассмотрим показания прибора по оси OX ИСК:

$$B_x = k_x t + c_x.$$

Коэффициент k_x можно определить из системы двух уравнений, где первое уравнение записано для температуры t_z , второе — для температуры t_0 , для оси OX ИСК:

$$\begin{aligned} 0 &= k_x t_z + c_x; \\ B_x &= k_x t_0 + c_x. \end{aligned} \tag{10}$$

Тогда с учетом формулы (8) можно записать

$$k_x = \frac{B_x}{B_0} k. \tag{11}$$

Очевидно, что температурная коррекция по оси OX ИСК будет иметь следующий вид (рис. 6):

$$B_x^t = B_x - k_x (t - t_0).$$

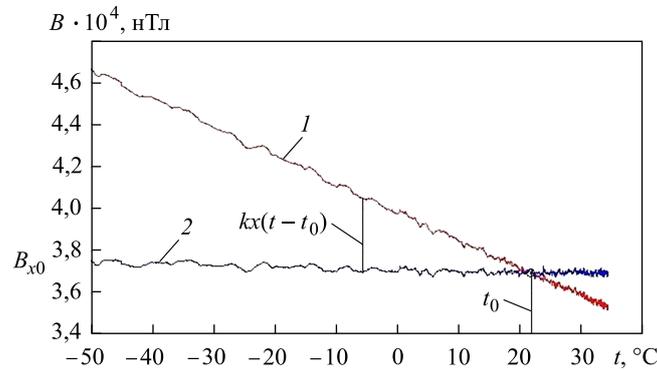


Рис. 6. Начальные (1) и скорректированные (2) показания магнитометра (синие линии) в зависимости от температуры для оси ОХ ИСК

С учетом соотношения (11) и при условии, что начальная ориентация прибора может изменяться, получим

$$B_x^t = B_x - \frac{B_x}{B_0} k(t - t_0),$$

где B_x , B_x^t — показания магнитометра для оси ОХ ИСК без и с учетом температурной компенсации.

В общем виде уравнения, описывающие температурную коррекцию для каждой из осей ИСК, примут вид

$$\begin{aligned} B_x^t &= B_x - \frac{B_x}{B_0} k(t - t_0); \\ B_y^t &= B_y - \frac{B_y}{B_0} k(t - t_0); \\ B_z^t &= B_z - \frac{B_z}{B_0} k(t - t_0). \end{aligned} \quad (12)$$

Запишем выражение (12) в векторном виде:

$$\mathbf{V}_i^t = \mathbf{V}_i \beta(t),$$

где \mathbf{V}_i , \mathbf{V}_i^t — векторы магнитной индукции внешнего магнитного поля в ИСК без учета (определенный ранее) и с учетом температурной коррекции:

$$\beta(t) = 1 - \frac{k}{B_0} (t - t_0).$$

Тогда выражение (1) можно представить следующим образом:

$$\mathbf{V}_i^t = T(\mathbf{m}_i - \mathbf{b} - \mathbf{n}_i)\beta(t).$$

Следует отметить, что данный вид калибровки справедлив для используемых в исследуемом приборе магниточувствительных датчиков НМС 1001.

Парирование различия между ИСК и БСК. В общем случае ИСК нельзя непосредственно увязать с системами координат, связанными с корпусом КА. Для обеспечения возможности реального использования прибора его измерения необходимо представить в некоторой БСК, жестко связанной с корпусом магнитометра, что позволяет посредством прецизионной выставки увязать системы координат магнитометра с корпусом ИСЗ.

Аналитическое решение задачи перехода от ИСК к БСК является весьма громоздким и потому малоэффективно в инженерных расчетах. Необходимую матрицу перехода M для каждого тарированного магнитометра можно получить эмпирическим путем.

Для нахождения матрицы M представляется целесообразным использование следующей модели измерения:

$$\mathbf{V}_i^b = M\mathbf{V}_i^t,$$

где \mathbf{V}_i^t — вектор магнитной индукции магнитного поля в ИСК с учетом температурной компенсации; M — матрица перехода из ИСК в БСК; \mathbf{V}_i^b — вектор магнитной индукции магнитного поля в БСК.

Сложность нахождения матрицы M заключается в том, что нельзя с достаточной точностью задать внешнее магнитное поле, поэтому в данной методике предлагается использовать в качестве внешнего магнитного поля вектор магнитной индукции геомагнитного поля Земли \mathbf{V}_e . Предполагается, что вектор \mathbf{V}_e в ходе эксперимента постоянен как по модулю, так и по направлению, другие внешние магнитные поля отсутствуют.

Согласно математическому определению, матрица перехода является матрицей, столбцы которой соответствуют координатам нового базиса в старом, записанным по столбцам. В случае матрицы M это координаты базиса БСК в ИСК.

Таким образом, чтобы получить первый столбец матрицы M , надо найти проекции орта $\overline{\mathbf{x}}_0$ БСК в ИСК, или для получения строки — проекции орта ИСК в БСК. Аналогично для двух других столбцов/строк.

Для нахождения проекций этих ортов предлагается провести эксперимент. Магнитометр устанавливают на поворотный стол так, что-

бы ось вращения стола совпадала с осью вращения прибора. Далее стол совершает целое число оборотов вокруг исследуемой оси с одинаковой частотой вращения.

При вращении вокруг оси OX ИСК вектор \mathbf{V}_e , который в БСК постоянен, в ИСК опишет конус (рис. 7).

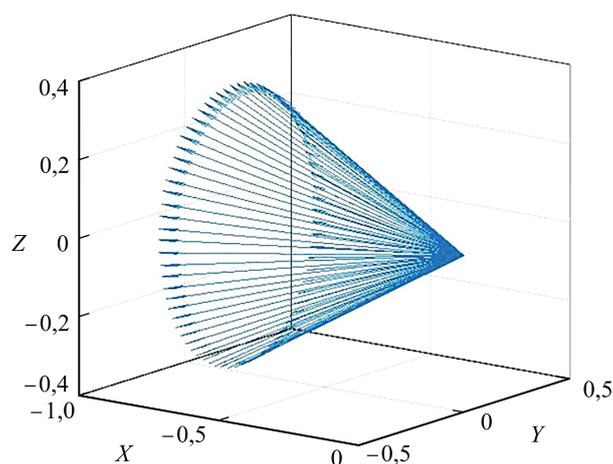


Рис. 7. Конус, образованный вектором \mathbf{V}_e в ИСК, при вращении вокруг оси OX БСК

Высота этого конуса при ее нормировании будет соответствовать орту ИСК для оси, вокруг которой проводилось вращение, взятому с противоположным знаком, так как вектор \mathbf{V}_e противоположен направлению исследуемой оси (рис. 8).

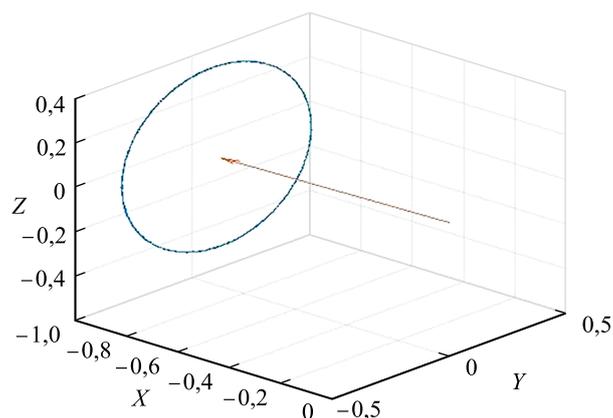


Рис. 8. Высота конуса, образованного вектором \mathbf{V}_e в ИСК, и геометрическое место концов векторов \mathbf{V}_e при вращении вокруг оси OX БСК

В идеальном случае БСК и ИСК совпадают, проекции полученной высоты в БСК $[-1; 0; 0]$, матрица M будет единичной. Но в действительности это не так (рис. 9). Высота будет иметь некоторые проекции по осям OY и OZ БСК, которые являются проекциями орта $-\mathbf{x}_0$ ИСК в БСК и будут составлять первый столбец матрицы M .

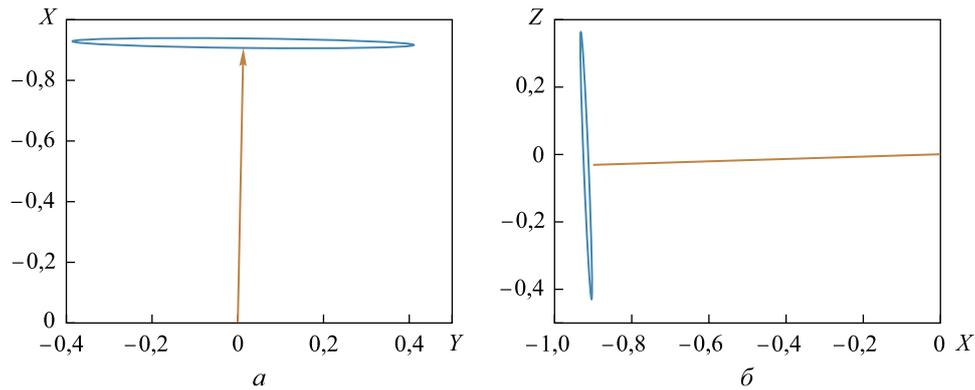


Рис. 9. Высота конуса, образованного вектором \mathbf{V}_e в ИСК, в проекциях на плоскости БСК XY (а) и XZ (б)

Для нахождения двух других столбцов, необходимо провести аналогичные действия для осей OY и OZ прибора.

С учетом выражения (1) при переходе к вектору магнитной индукции магнитного поля в БСК \mathbf{V}_i^b итоговая модель работы магнитометра в БСК будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{V}_i^b = M(T(\mathbf{m}_i - \mathbf{b} - \mathbf{n}_i) - \boldsymbol{\beta}(t)). \quad (6)$$

Алгоритмы определения параметров работы магнитометра. Определение параметров работы магнитометра, входящих в выражение (6), целесообразно проводить экспериментально в стендовых условиях.

Для определения матрицы T , учитывающей влияние паразитного внешнего магнитного поля, масштабирование и неортогональность чувствительных элементов, предлагается следующий подход.

Магнитометр помещают на поворотный стол, который имеет возможность программного управления двумя углами ориентации: азимутом и углом места. При апробировании алгоритма использовали поворотный стол на основе двухперьевого вилочной монтировки Meade 12" LX90-ACF (рис. 10).



Рис. 10. Поворотный стол на основе Meade LX90-ACF

Эксперимент проводили в два установка для всех значений магнитного поля в проекции на ИСК. Точность каждого установка проверяли инклинометром. Погрешность горизонтальности плиты для установки датчика не должна превышать $0,1^\circ$.

Эксперимент состоял из четырех этапов.

Предварительно магнитометр устанавливают в позицию первого установка и начинается запись показаний прибора.

1. Азимут изменяется от 0 до -180° с шагом 5° , угол места изменяется от 90 до -90° с шагом 5° .

2. Азимут изменяется от 0 до 180° с шагом 5° , угол места изменяется от -90 до 90° с шагом 5° .

По окончании второго этапа магнитометр отключается и переустанавливается путем разворота на 90° относительно вертикальной оси Z ИСК. После этого вновь начинается запись показаний.

3. Азимут изменяется от 0 до -180° с шагом 5° , угол места изменяется от 90 до -90° с шагом 5° .

4. Азимут изменяется от 0 до 180° с шагом 5° , угол места изменяется от -90 до 90° с шагом 5° .

Затем проводится обработка полученных результатов. Для дальнейшей работы формируется набор векторов измерений магнитной индукции магнитного поля при различных ориентациях магнитометра относительно постоянного магнитного поля. Из каждого измерения необходимо вычесть вектор температурной калибровки $\beta(t)$, получая таким образом набор векторов \mathbf{M}_i . Далее проводится обработка измерений методом Ньютона — Гаусса в соответствии с выражениями (2)–(5). В результате получают значения коэффициентов матрицы T и смещения нуля \mathbf{b} .

При проведении температурной калибровки в стендовых условиях в соответствии с изложенной методикой в первую очередь необходимо определить коэффициент k . Для этого выполняют следующий комплекс операций.

1. Первоначально магнитометр помещают в холодильную камеру и охлаждают до $-60\dots-50$ °С.

2. Затем при условии постоянного внешнего магнитного поля идет непрерывное считывание показаний магнитометра (вектора индукции магнитного поля и температуры) при его нагреве до комнатной температуры.

3. Далее нагрев продолжается за счет использования специального теплогенератора при условии постоянства внешнего магнитного поля до температуры $60\dots70$ °С.

4. После окончания предшествующих операций магнитометр охлаждают до комнатной температуры.

В ходе данного эксперимента получили набор данных измерений магнитного поля и температуры для каждого момента времени измерения. Аппроксимируя полученные данные прямой, можно получить значение коэффициента k . Далее, задав значения t_0 и соответствующее значение B_0 , получим $\beta(t)$.

Для нахождения элементов матрицы перехода M можно использовать следующий алгоритм проведения эксперимента.

1. Магнитометр устанавливают на поворотный стол так, чтобы центр датчика совпадал с осью вращения поворотного стола. При этом магнитное поле вокруг стола должно быть максимально однородно.

2. Выполняют целое число полных поворотов датчика (360°) с постоянной частотой вращения поочередно относительно каждой из осей БСК.

Полученные измерения путем вращения вокруг конкретной оси нормируются и векторно суммируются. После чего показания координат делятся на число измерений. В результате получается высота конуса, направление которой совпадает с ортом ИСК.

Для получения орта следует нормировать высоту конуса. Проекции этой нормированной высоты в БСК являются элементами соответствующей строки матрицы перехода, взятыми с противоположным знаком, поскольку полученный орт будет направлен в сторону, противоположную оси. При проведении данной процедуры для всех трех осей будет получена матрица перехода от ИСК к БСК.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что предлагаемая температурная калибровка является более корректным и эффективным методом по сравнению с ранее используемыми, в частности методом использования постоянного коэффициента коррекции показаний. Приведенные геометрическая интерпретация и математическая модель влияния неортогональности, смещения нуля и других погрешностей обуславливают использование разработанного подхода к учету погрешностей. Немаловажным следует отметить инженерную

направленность разработанных методик, сочетающую эмпирический сбор данных для проведения калибровки и коррекции согласно аналитическим зависимостям. Погрешности позиционирования чувствительных элементов магнитометра можно исключить, применяя относительно простую методику на основе проведенных наземных диагностик.

Приведенные практические подходы, успешно апробированные и внедренные в ООО «Спутникс», подтвердили простоту и надежность получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. *Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [2] Тюлин А.Е., Бетанов В.В. *Летные испытания космических объектов. Определение и анализ движения по экспериментальным данным*. Москва, Радиотехника, 2016, 336 с.
- [3] Белецкий В.В., Хентов А.А. *Вращательное движение намагниченного спутника*. Москва, Наука, 1985, 288 с.
- [4] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. В 2 ч. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 (ч. I), 2010 (ч. II).
- [5] Фрайден Дж. *Современные датчики. Справочник*. Москва, Техносфера, 2005, 587 с.
- [6] Кружков Д.М. *Современные и перспективные интегрированные системы высокоточной навигации КА на геостационарной и высоких эллиптических орбитах на основе использования ГНСС-технологий*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МАИ, 2014.
- [7] Иванов Д.С., Ткачев С.С., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю. Калибровка датчиков для определения ориентации малого космического аппарата. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2010, № 28, с. 30.
- [8] Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. *Датчики. Перспективные направления развития*. Новосибирск, НГТУ, 2001, 176 с.
- [9] Mascarenhas W.F. On the divergence of line search methods. *Comput. Appl. Math.*, 2007, vol. 26, no. 1, pp. 129–169.
- [10] Vasconcelols J.F., Elkaim G., Silvester C., Oliviera P., Cardeira B. A Geometric Approach to Strapdown Magnetometer Calibration in Sensor Frame, *IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, Killaloe, Ireland, April 2008, pp. 12.
- [11] Charles F. Van Loan. The Ubiquitous Kronecker Product. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, vol. 123, pp. 85–100.

Статья поступила в редакцию 23.10.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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*, 2018, вып. 5.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1762>

Акимов Илья Олегович — студент 6-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана. Инженер ООО «СПУТНИКС». e-mail: akimov-94@mail.ru

Илюхин Степан Николаевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. Ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных и научно-популярных работ в области баллистики, динамики полета, управления движением летательных аппаратов и истории оружия. e-mail: iljuchin.stepan@bmstu.ru

Ивлев Никита Анатольевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Научный сотрудник, заведующий лабораторией «Высокоточные системы ориентации» МФТИ, руководитель направления ООО «СПУТНИКС», аспирант ИКИ РАН. e-mail: nikitaiivlev@mail.ru

Колосов Геннадий Евгеньевич окончил МГУ имени М.В. Ломоносова в 1959 г. Профессор кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области динамики полета, управления движением летательных аппаратов, управления в технических системах. e-mail: prof_g_kolosov@mail.ru

Magnetometer calibration technique for the ground-based stage of spacecraft system diagnostics

© I.O. Akimov^{1,2}, S.N. Ilyukhin², N.A. Ivlev¹, G.E. Kolosov²

¹Sputnix JSC, Moscow, 121059, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article lists empirical techniques for thermal calibration and accounting for intrinsic error in magnetometers used in onboard measurement equipment of modern spacecraft. We developed a mathematical model of magnetometer readings that takes into account current measurement errors and provided a geometrical interpretation of errors. We present the relationship between readings of typical magnetic sensors and ambient temperature. We formulated a thermal calibration technique for instrument readings that ensures instrument accuracy at different temperatures. We introduce an approach to determining a transformation matrix connecting magnetometer coordinate systems that makes it possible to eliminate component positioning errors occurring during magnetometer assembly; we also describe development testing algorithms approved by the core enterprise for gathering data required for implementing the techniques under consideration. We provide the results of calibrating a magnetometer using the techniques developed.

Keywords: magnetometer, thermal calibration, measurement processing, magnetic field

REFERENCES

- [1] Lysenko L.N., Betanov V.V., Zvyagin F.V. *Teoreticheskie osnovy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniya kosmicheskikh poletov* [Theoretical foundations of ballistics and navigation support of space missions]. Moscow, BMSTU Publ., 2014.
- [2] Tyulin A.E., Betanov V.V. *Letnye ispytaniya kosmicheskikh obektov. Opredelenie i analiz dvizheniya po eksperimentalnym dannym* [Flight testing of spacecraft. Motion assessment and analysis based on experimental data]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016, 336 p.
- [3] Beletskiy V.V., Khentov A.A. *Vrashchatelnoe dvizhenie namagnichennogo sputnika* [Rotary motion of a magnetised satellite]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 288 p.
- [4] Solovev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Space flight control]. In 2 vols. Moscow, BMSTU Publ., 2009 (vol. 1), 2010 (vol. 2).
- [5] Fraden J. *Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications*. New York, Springer-Verlag, 2004, 608 p. [In Russ.: Fraden J. *Sovremennye datchiki. Spravochnik*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005, 587 p.].
- [6] Kruzhkov D.M. *Sovremennye i perspektivnye integrirovannye sistemy vysokotochnoy navigatsii KA na geostatsionarnoy i vysokikh ellipticheskikh orbitakh na osnove ispolzovaniya GNSS-tehnologiy*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Modern and promising integrated systems of precision spacecraft navigation at geostationary and highly elliptical orbits based on GNSS technology. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, MAI Publ., 2014.
- [7] 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.

- [8] Aleynikov A.F., Gridchin V.A., Tsapenko M.P. *Datchiki. Perspektivnye napravleniya razvitiya* [Sensors. Promising development directions]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2001, 176 p.
- [9] Mascarenhas W.F. On the divergence of line search methods. *Comput. Appl. Math.* 2007, vol. 26 (1), pp. 129–169.
- [10] Vasconcelos J.F., Elkaim G., Silvester C., Oliveira P., Cardeira B. A Geometric Approach to Strapdown Magnetometer Calibration in Sensor Frame. *IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, Killaloe, Ireland, April 2008, p. 12.
- [11] Van Loan C.F. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, vol. 123, pp. 85–100.

Akimov I.O. (b. 1994) 6th year student, Bauman Moscow State Technical University. Engineer, Sputnix JSC. e-mail: akimov-94@mail.ru

Ilyukhin S.N. (b. 1990) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2013. Assistant Lecturer, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 scientific and popular science publications in the fields of ballistics, flight dynamics, aircraft motion guidance and armament history. e-mail: iljuchin.stepan@bmstu.ru

Ivlev N.A. (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2010. Research Fellow, Head of Precise Orientation Systems Lab, MIPT; Head of Branch, Sputnix JSC; post-graduate student, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. e-mail: nikitavlev@mail.ru

Kolosov G.E. (b. 1936) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1959. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 scientific and popular science publications in the fields of flight dynamics, aircraft motion guidance and control in engineering systems. e-mail: prof_g_kolosov@mail.ru