

ТЕХНОЛОГИЯ СТЕНДОВОЙ КАЛИБРОВКИ ТЕНЗОРНЫХ МАГНИТОГРАДИЕНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Павлов Б. В.¹, Каршаков Е. В.², Гольдин Д. А.³ Волковицкий А. К.⁴

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Предложена технология стендовой калибровки тензорной магнитоградиентной измерительной системы. В основе предложенных алгоритмов лежит оценка влияния эталонного магнитного источника, описываемого пространственным распределением скалярного магнитного потенциала, на калибруемый магнитоградиентометр. Разработаны алгоритмы докалибровки векторных датчиков, которые необходимо выполнять в точке с минимальным градиентом магнитного поля или в соленоидальном поле. Разработан алгоритм оценки положения базового датчика, который заключается в последовательных поворотах магнитоградиентной измерительной системы вокруг своего центра при неподвижном калиброванном источнике поля. Разработан алгоритм оценки направления вектора дипольного момента при известном положении датчика относительно источника поля. Разработан алгоритм оценки положения векторных датчиков относительно базового. Разработан алгоритм технологии калибровки тензорного магнитоградиентометра. Реализация описанной технологии калибровки в совокупности с технологией калибровки существующих датчиков магнитной индукции позволила обеспечить калибровку всех параметров магнитоградиентной измерительной системы и определение точного взаимного расположения датчиков и взаимной ориентации всех осей чувствительности.

Ключевые слова: калибровка, тензорные магнитоградиентометры, магнитоградиентная измерительная система.

1. Введение

Эффективность применения магнитоградиентных измерительных систем (МИС) и комплексов радикально зависит от точности измерений. Основная сложность в достижении высокой измерительной точности МИС связана с необходимостью

¹ Борис Викторович Павлов, д.т.н. (pavlov@ipu.ru).

² Евгений Владимирович Каршаков, д.т.н. (karshak@mail.ru).

³ Дмитрий Алексеевич Гольдин, к.т.н. (goldind@ipu.ru).

⁴ Андрей Кириллович Волковицкий, д.т.н. (avolkovitsky@yandex.ru).

учета и компенсации значительного числа систематических ошибок различной природы. Решению этой задачи служат предлагаемые методы и алгоритмы калибровки МИС.

В то время, как основополагающие принципы, методики и алгоритмы калибровки самих магниточувствительных датчиков известны по значительному числу работ [1, 4-5, 8-9, 11-21], вопросы калибровки магнитоградиентных измерительных систем и комплексов и сегодня представляют сложность в теоретическом плане и при практической реализации. Это связано с тем, что при калибровке МИС помимо коррекции систематических ошибок отдельных чувствительных элементов необходимо скорректировать ошибки разностных измерений. В частности, выполнить оценку параметров тех систематических погрешностей, которые возникают из-за неточного сведения осей чувствительности входящих в систему датчиков, а также в максимальной степени исключить влияние сторонних возмущающих факторов.

В настоящей статье рассматривается технология стендовой калибровки тензорной магнитоградиентной измерительной системы.

2. Исходные данные

Тензорным магнитным градиентометром будем называть конструкцию, включающую четыре векторных магнитометра, работающих в дифференциальном режиме при фиксированном известном разnose датчиков. Один из вариантов конструкции приведен на рисунке 1.

В основе методов стендовой калибровки лежит оценка влияния эталонного магнитного источника (диполя), описываемого пространственным распределением скалярного магнитного потенциала U^B , на калибруемый магнитоградиентометр.

$$(1) \quad U^B = -\frac{\mu\mu_0|M|}{4\pi|r|^2}(e_r^T e_M).$$

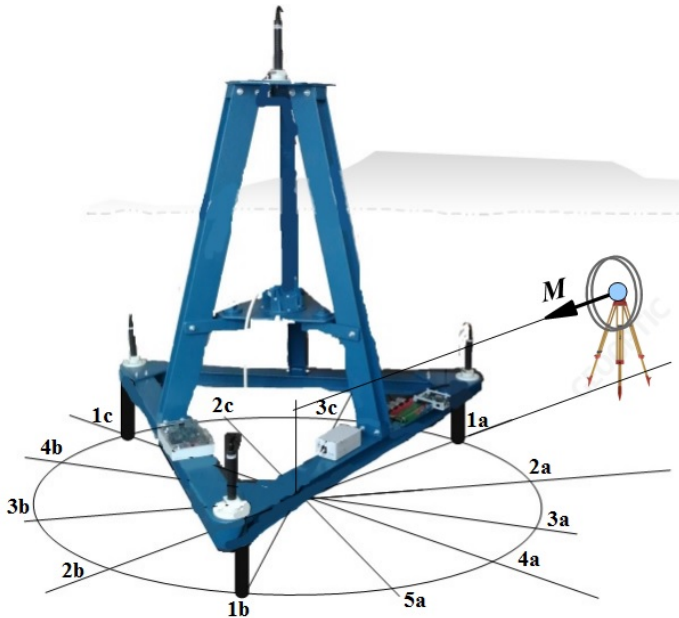


Рис. 1. Магнитоградиентная система.

В формуле (1): r – радиус-вектор точки наблюдения относительно источника поля, $e_r = r/|r|$ – единичный вектор, направленный вдоль вектора r , μ – относительная магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ), M – вектор магнитного момента диполя, $e_M = M/|M|$ – единичный вектор, направленный вдоль вектора M . Из выражения (1) могут быть получены формулы для расчета значений всех потенциально измеримых параметров.

Выражение для вектора индукции поля (первая производная потенциала), которое устанавливает соотношение между измеряемым вектором и дипольным моментом, имеет вид:

$$(2) \quad B = \frac{\partial U^B}{\partial r} = \frac{\mu \mu_0 |M|}{4 \pi |r|^3} (3 e_r e_r^T - I) e_M.$$

Здесь I – единичная матрица 3 на 3, $e_r e_r^T$ – матрица диадного (покомпонентного) произведения векторов.

Формула (2) удобна тем, что для нее можно выписать обратную формулу [2, 7]:

$$(3) \quad M = \frac{4\pi|r|^3}{\mu\mu_0} \left(\frac{3}{2} e_r e_r^T - I \right) B.$$

С помощью (3), зная вектор поля и радиус-вектор источник-измеритель, можно вычислить вектор дипольного момента.

При решении задачи стендовой калибровки магнитоградиентной системы предполагается, что:

1 калибровка системы проходит с использованием поворотного стенда (рисунок 1) и эталонного источника поля M , установленного на расстоянии r от калибруемой системы;

2 четыре векторных датчика, входящих в систему, предварительно откалиброваны;

3 в МИС включен эталонный квантовый датчик поля.

При сделанных предположениях задача стендовой калибровки магнитоградиентной системы сводится к:

1 докалибровке векторных датчиков;

2 оценке положения базового датчика;

3 оценке положения векторных датчиков относительно базового.

3. Алгоритмы докалибровки векторных датчиков

Данный этап калибровки желательно выполнять в точке с минимальным градиентом магнитного поля или в соленоидальном поле. Следует последовательно поворачивать датчик по разным направлениям. Критерий, обеспечивающий возможность оценки погрешностей датчика, – модуль поля, полученный по измерениям компонент векторным датчиком, должен совпадать с модулем, измеренным квантовым датчиком, вне зависимости от текущей ориентации векторного датчика.

Следует подобрать смещения нуля и масштабный коэффициент по каждой оси, а также матрицу малых углов взаимного

перекоса осей чувствительности. Учитывая характер эксперимента, матрицу следует подбирать верхне- или нижнетреугольной. Таким образом, необходимо определить девять параметров вектора X : три смещения нуля X_1, X_2, X_3 , три масштабных коэффициента X_4, X_5, X_6 , по каждой оси, а также три угла взаимной неортогональности осей: X_7, X_8 – первая ось по отношению ко второй и третьей, X_9 – вторая ось по отношению к третьей. Для каждого векторного датчика $i = 1, \dots, 4$ требуется решить следующую задачу:

$$(4) \quad X : \sum_{i=1}^n \{ \tilde{Z}_i^2 - Z_i^2 - 2(Z_i \cdot \delta Z_i) \}^2 \rightarrow \min$$

где Z_i – трехмерный вектор измерений i -го векторного датчика, – измерения квантового датчика (априорно заданное значение модуля магнитного поля в точке калибровки), – трехмерный вектор поправок, рассчитанный через компоненты 9-мерного вектора параметров X по формулам

$$(5) \quad \begin{aligned} \delta Z_{1i} &= X_1 + X_4 \cdot Z_{1i} + X_7 \cdot Z_{2i} + X_8 \cdot Z_{3i} \\ \delta Z_{2i} &= X_2 + X_5 \cdot Z_{2i} + X_9 \cdot Z_{3i} \\ \delta Z_{3i} &= X_3 + X_6 \cdot Z_{3i} \end{aligned}$$

Следует отметить, что функционал (4) является результатом линеаризации функционала невязок между квадратами модуля поля для скалярного и векторного датчиков, то есть изначально задача нелинейная. Однако, в силу предполагаемой малости погрешностей можно выполнить линеаризацию, пренебрегая малыми величинами второго порядка.

В результате задача сводится к решению линейной системы уравнений

$$(6) \quad 2(H H^T) X = H \sum_{i=1}^n (\tilde{Z}_i^2 - Z_i^2)$$

где матрица (вектор)

$$(7) \quad H^T = \sum_{i=1}^n (Z_{1i}, Z_{2i}, Z_{3i}, Z_{1i}^2, Z_{2i}^2, Z_{3i}^2, Z_{1i}Z_{2i}, Z_{1i}Z_{3i}, Z_{2i}Z_{3i}).$$

Решение системы (6) можно реализовать методом Гаусса.

4. Алгоритм оценки положения базового датчика

Эксперимент по определению положения базового датчика заключается в последовательных поворотах магнитоградиентной измерительной системы вокруг своего центра при неподвижном калиброванном источнике поля.

Поскольку при поворотах выставить систему абсолютно точно достаточно трудно, а погрешность выставки обязательно скажется на результатах калибровки, все измерения следует привязывать к показаниям одного из датчиков, а все остальные параметры подбираются уже по отношению к этому, базовому датчику.

Выбрав один из датчиков в качестве базового, имея три компоненты измеренного поля, можно определить три компоненты радиус-вектора, полагая известными параметры диполя (его направление и амплитуду). Метод подбора следующий.

Предполагается, что взаимная ориентация датчика и источника поля известна. Используя (2), можно получить приближительное значение Якобиана, варьируя компоненты радиус-вектора:

$$(8) \quad \frac{\partial B}{\partial r^i} \approx \frac{B(r + \delta r^i) - B(r - \delta r^i)}{2|\delta r^i|},$$

$$\delta r_j^i = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ \delta, & i = j \end{cases}$$

Здесь $j = 1, 2, 3$ – номер компоненты вектора δr^j .

Линеаризованная модель измерений будет иметь вид

$$(9) \quad Z = \frac{\partial B}{\partial r} \cdot X + \rho,$$

где X – искомый вектор поправок к априорной оценке положения диполя, в отличие от предыдущей задачи здесь имеет только три компоненты, ρ – вектор шумов измерений магнитного поля векторным датчиком. В качестве алгоритма решения используем следующую модификацию обобщенного фильтра Калмана (ФК) с последовательными приближениями.

$$(10) \quad \begin{aligned} \tilde{X}^+ &= \tilde{X}^- + S_p^- K (Z_i - h_i^T \tilde{X}^-), \\ S_p^+ &= S_p^- (I - K h_i^T S_p^-)^{1/2}, \\ K &= \frac{1}{(\sigma^2 + h_i^T S_p^- S_p^{-T} h_i)} S_p^{-T} h_i. \end{aligned}$$

Здесь i – индекс компоненты вектора (поскалярная обработка), h_i – соответствующая строка матрицы Якоби (5), σ^2 – дисперсия шума измерений компонент магнитного поля, K – коэффициент ФК, S_p – верхнетреугольный квадратный корень из ковариационной матрицы ошибки оценки

$$(11) \quad P = S_p S_p^T,$$

индекс „+“ – апостериорная оценка, „–“ – априорная оценка.

Получив X^+ , мы имеем улучшенную оценку положения диполя

$$(12) \quad r^+ = r + X^+$$

Эта улучшенная оценка положения диполя, в свою очередь, также может быть улучшена при повторной обработке с новой матрицей Якоби. Таким образом реализуется итерационный обобщенный ФК [10]. Критерием остановки последовательных приближений является величина невязки измеренного и вычисленного для текущего r вектора магнитного поля:

$$(13) \quad \Delta = |Z^{изм} - Z^{выч}|.$$

Как только данная величина достигает σ (шум измерений), дальнейшие итерации теряют смысл. Также поиск решения останавливается, когда невязка перестает уменьшаться.

Для того, чтобы получить направление дипольного момента M при известном положении датчика относительно источника поля, описанную выше задачу можно решать с вариациями компонент M . При этом модуль $|M|$ сохраняется неизменным, поскольку он вычисляется по измерениям тока, а выбирается то направление дипольного момента, при котором конечная невязка после решения задачи оценивания минимальна.

5. Алгоритм оценки положения векторных датчиков относительно базового

При оценке положения векторных датчиков относительно базового используется тот же набор измерений, что и в предыдущем эксперименте. Это важно, поскольку это снимает требования к механически строгому соблюдению положения магнитогradientной измерительной системы. В результате калибровочного эксперимента необходимо вычислить малые углы поворота каждой оси чувствительности каждого датчика по отношению к соответствующей оси базового датчика. Также можно определить малые вектора смещения векторных датчиков. Все это делается в предположении, что от поворота к повороту конструкция платформы остается неизменной, то есть углы поворота и смещения являются постоянными величинами.

Задача может решаться в трех вариантах. Первый – подбор только ортогонального поворота (три параметра) для каждого датчика, то есть полагаются датчики идеально откалиброванными и их положения точно известными. Второй – подбор ортогонального поворота и смещения (еще три параметра, всего шесть), то есть взаимная установка датчиков неидеальна. Третий – подбор смещения и углов перекося осей (еще шесть параметров, всего девять, так как ортогональный поворот уже не подбирался). Обработку данных можно выполнять одновремен-

но с анализом стохастических мер оцениваемости [3, 6]. Возможно, что из шести углов перекося какие-то плохо оцениваются. Поэтому итоговая размерность вектора параметров после декомпозиции для каждого датчика может уменьшиться.

Основным измерением являются измерения компонент вектора поля каждым из датчиков вида, аналогичного (9), измерения независимы.

$$(14) \quad Z = \frac{\partial B}{\partial X} \cdot X + \rho,$$

Алгоритм оценивания – обобщенный ФК вида (10). Учитывая количество параметров, одной точки установки датчика для решения недостаточно. Однако, поскольку все параметры подбираются в связанной системе координат, то в отличие от предыдущего этапа калибровки здесь изменения параметров при повороте не происходит.

Следует выполнять несколько итераций, после каждой вводить поправки с учетом полученных оценок. Критерием прекращения итераций является получение вектора оценки, компоненты которого не превосходят определенного порога в смещениях и углах. Для максимальной размерности вектор состояния имеет следующий вид:

$$(15) \quad X = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, x_1, x_2, x_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{21}, \beta_{23}, \beta_{31}, \beta_{32}).$$

Здесь α_i – углы ортогональных поворотов вокруг соответствующей оси, x_i – смещения вдоль соответствующей оси, β_{ij} – углы перекося i -й оси калибруемого датчика к j -й оси базового.

Если стохастическая мера оцениваемости для каких-то углов составляет всего лишь около 0,5, данные углы в эксперименте являются плохо оцениваемыми, или плохо наблюдаемыми величинами – среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибки оценки для них улучшается всего лишь в 2 раза. Учитывая сказанное, можно либо поменять условия эксперимента, что предпочтительно, либо, в крайнем случае, произвести декомпо-

зацию по стохастической мере оцениваемости, например так (для плохой оцениваемости β_{31}, β_{32}):

$$(16) \quad X = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, x_1, x_2, x_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{21}, \beta_{23}).$$

Надо при этом отдавать отчет в том, что неполная оценка параметров ведет за собой ограничения по условиям применения калибруемой магнитоградиентной системы.

По окончанию калибровки можно реализовать базовый алгоритм определения параметров дипольного магнитного момента для оценки положения и амплитуды дипольного момента должны соответствовать измеренным значениям. В противном случае калибровку следует провести повторно.

6. Особенности применения технологии калибровки тензорного магнитоградиентометра

Предложенная выше технология была применена для калибровки тензорного магнитоградиентометра, показанного на рисунке 1.

Для измерений индукции магнитного поля используются четыре векторных феррозондовых датчика НВ 0302. В целях калибровки в систему также входит скалярный квантовый магнитометр. Магнитоизмерительная система оснащена блоком преобразования измерительной информации и интерфейсом взаимодействия с вычислительной подсистемой.

На аналоговых выходах каждого из датчиков в процессе работы вырабатываются следующие сигналы: опорное напряжение и напряжения, пропорциональные величине проекции вектора индукции магнитного поля на направление соответствующей оси чувствительности.

Преобразование сигналов векторных датчиков в системе осуществляется с помощью блока формирования сигналов векторных датчиков и контрольных диполей.

При проведении калибровки было учтено, что максимальный дипольный момент, который удавалось развить в диполе, составил величину порядка 100 Ам^2 , что в совокупности с уров-

нем чувствительности датчиков порядка 1 нТл ограничило рабочую зону эксперимента размерами порядка 10 м.

Результаты калибровки системы представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты калибровки датчиков 1 и 2

Значения параметров смещения нулей, масштабные коэффициенты, углы перекоса				
Параметр	1		2	
	пасп.	калиб.	пасп.	калиб.
ΔX	0,012	0,0117	0,012	0,0095
ΔY	0,021	0,0216	0,026	0,0223
ΔZ	0,022	0,0191	0,019	0,0242
K_X	0,987	0,9857	0,953	0,9616
K_Y	0,988	0,986	0,968	0,9666
K_Z	0,906	0,9042	0,965	0,9669
K_{XY}	-0,0435	-0,0446	-0,0119	-0,0106
K_{XZ}	-0,0178	0,0036	-0,0032	0,0194
K_{YX}	0	0	0	0
K_{YZ}	-0,0093	-0,0022	-0,0124	-0,0045
K_{ZX}	0,0214	0	0,0264	0

Таблица 2. Результаты калибровки датчиков 3 и 4

Значения параметров смещения нулей, масштабные коэффициенты, углы перекоса				
Параметр	3		4	
	пасп.	калиб.	пасп.	калиб.
ΔX	0,0097	0,0091	0,015	0,0132

ΔY	0,021	0,0191	0,025	0,0217
ΔZ	0,021	0,0212	0,023	0,0271
K_X	0,965	0,9644	0,954	0,9537
K_Y	0,982	0,9814	0,946	0,9446
K_Z	0,974	0,9752	0,965	0,9645
K_{XY}	-0,0123	-0,0101	-0,0057	-0,0635
K_{XZ}	0,0073	0,0231	-0,0021	0,0366
K_{YX}	0	0	0	0
K_{YZ}	-0,0098	-0,0108	-0,0165	-0,0172
K_{ZX}	0,0148	0	0,0362	0

Докалибровка используемых феррозондовых датчиков позволила свести погрешность до уровня 10 нТл. В то время, как паспортные параметры, указанные в первом столбце таблиц 1 и 2, дают погрешность измерения поля Земли порядка 1000 нТл.

Эксперимент по оценке положения диполя для каждой точки измерений калибровочного эксперимента заключается в последовательных поворотах платформы с шагом 30 градусов вокруг своей оси при неподвижном диполе. За базовый выбран датчик № 2 (рисунок 1). Результаты калибровки представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты калибровки положения диполя

Азимут $^{\circ}$	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	невязка, нТл
270	-0,009	+0,001	-0,002	0,028
300	+0,001	+0,024	-0,004	0,054
330	+0,007	+0,034	-0,046	0,032
0	+0,006	+0,025	-0,051	0,036
30	+0,017	-0,016	-0,0096	0,044
60	+0,003	-0,007	-0,017	0,025

90	+0,002	+0,013	−0,032	0,025
120	−0,0097	+0,024	−0,026	0,057
150	−0,015	+0,022	−0,0024	0,056
180	−0,011	+0,028	+0,011	0,051
210	−0,016	+0,022	−0,013	0,053
240	−0,018	+0,014	−0,015	0,031
270	−0,007	+0,042	−0,006	0,024
СКО ошибок оценок	0,004	0,006	0,006	
Вектор диполя	наклонение:	−2,7°	склонение:	5,2°

Калибровочный эксперимент по оценке положения феррозондов относительно базового состоит в вычислении малых углов поворота каждой оси чувствительности каждого датчика по отношению к соответствующей оси базового датчика. Также определялись малые вектора перемещения феррозондов. Все это делалось в предположении, что от поворота к повороту конструкция платформы остается неизменной, то есть углы поворота и смещения являются постоянными величинами.

Обработка данных с анализом стохастических мер оцениваемости показала, что из шести углов перекоса два плохо оцениваются. Поэтому итоговая размерность вектора параметров после декомпозиции — 7 для каждого датчика.

В эксперименте вертикальная компонента поля для трех калибруемых датчиков минимальна — ось диполя для них все время находится в плоскости осей 1, 2. Как следствие, достоверность величин β_{31} , β_{32} не подтверждается стохастическими мерами оцениваемости. В то время, как меры оцениваемости практически всех углов поворота и перекоса близки к 1, мера оцениваемости указанных углов составляет всего лишь около 0,5. Это означает, что данные углы в данном эксперименте являются плохо оцениваемыми, или плохо наблюдаемыми величинами —

СКО ошибки оценки для них улучшается всего лишь в 2 раза, с 0,1 до 0,04-0,05 радиана. Оценки приведены в таблице 4.

Таблица 4. Оценки ортогональных поворотов, линейных смещений и перекосов осей датчиков

Оценки смещений						
Датчик	Δx , м	Δy , м	Δz , м			
1	0,021	0,005	0,015			
3	0,013	−0,012	0,015			
4	0,006	−0,003	0,022			
Оценки ортогональных поворотов						
Датчик	вокруг x , °	вокруг y , °	вокруг z , °			
1	−0,1	−0,7	0,7			
3	0,6	−1,5	−1,3			
4	−1,1	−2,7	3,1			
Оценки перекосов осей						
Датчик	y к x , °	z к x , °	x к y , °	z к y , °	x к z , °	y к z , °
1	0,2	−9,4	−0,3	0,4	0,1	0,1
3	−0,2	11,5	0,2	9,2	0,15	0,1
4	0,15	−5,3	−0,3	6,8	0,1	0,1

7. Заключение

При калибровке магнитоградиентометра на калибровочном стенде с диполем в качестве эталонного источника требуется исключить влияние следующих факторов.

1. Не должно влиять поле Земли. Наиболее реальный вариант решения это – использовать источник переменного магнитного поля.

2. Не должны влиять размеры источника. Для этого геометрические размеры излучающей петли эталонного источника должны быть существенно меньше дистанции d между датчика-

ми системы, а дипольный момент достаточно большим, чтобы создавать значимую амплитуду поля на дистанции в несколько d .

3. Не должно влиять изменение дипольного момента. Для этого необходимо обеспечить стабильность климатических условий, чтобы сохранялись геометрические параметры эталонного источника, а ток в петле должен контролироваться с высокой точностью.

Реализация описанной технологии калибровки в совокупности с технологией калибровки существующих датчиков магнитной индукции позволит обеспечить калибровку всех параметров магнитоградиентной измерительной системы и определение точного взаимного расположения датчиков и взаимной ориентации всех осей чувствительности.

Литература

1. ВАСИЛЮК Н.Н. Калибровка коэффициентов линейной модели интегрального магнитометра за счет использования измерений трехосного гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2019. – Т. 27, № 1. – С. 107-126.
2. ГЕТЬМАН Р.В., ЗАТЕЕВ А.А., ИВАНОВ Ю.М., МАТИСОВ В.Я., СЕМЕНОВ В.Г. Анализ погрешностей измерений магнитного момента кораблей в дальнем поле // Морской вестник. – 2018. – №1(65). – С. 102-104.
3. ГОЛОВАН А.А. Методы исследования задач оценивания и их приложения к задачам инерциальной и спутниковой навигации в авиационной гравиметрии: Диссертация на соискание степени д.ф.-м.н. по специальности 01.02.01. – МГУ им. М.В. Ломоносова, мех.-мат. факультет, 2002. – 112 с.
4. 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. – 30 с. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-28> (дата обращения 15.01.2024).

5. КАРШАКОВ Е.В., ХАРИЧКИН М.В. *Стохастическая задача оценивания* // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 7. – С.68-77.
6. ПАРУСНИКОВ Н.А., ГОЛОВАН А.А., ВАРАВВА В.Г. *О стохастической мере оцениваемости* // Коррекция в навигационных системах. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 4-7.
7. BILLINGS S. *Superconducting magnetic tensor gradiometer-system for detection of underwater military munitions* // SERDP Project MR-1661. - Ashland, OR, USA: Sky Research Inc., Final report, 2012.
8. BISON G.A., WYNANDS R., WEIS A. *Laser-pumped magnetometer for the mapping of humancardiomagnetic fields* // Appl. Phys. – 2003. – Vol. 76, № 3. – P. 325-328.
9. CHENG CHI, JUN-WEI LW, DAN WANG. *Calibration of tri-axial magnetometer with ellipsoid fitting method* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 237, Iss. 3. – P. 1-6. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/237/3/032015/pdf> (дата обращения: 12.02.2024).
10. KARSHAKOV E.V. *Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion* // Exploration Geophysics. – 2020. – Vol. 51, Iss.1. – С. 66-73.
11. KOK M., SCHON T.B. *Magnetometer calibration using inertial sensors* // IEEE Sensors Journal. – 2016. – № 16(14). – P. 5679-5689.
12. LI X., LI. Z. *A new calibration method for tri-axial field sensors in strap-down navigation systems* // Measurement Scienes and Technology. – 2012. – № 23(10). – P. 2852-2855.
13. LI W., CAI H., ZHAO S., LIU C. *Real-time magnetic field calibration method based on extended Kalman filter* // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Iss. 1627. – P. 1-8. – URL: https://www.researchgate.net/publication/344528971_Real-Time_Magnetic_Field_Calibration_Method_Based_on_Extended_Kalman_Filter (дата обращения: 12.02.2024).
14. PANG H., PAN M., WANG W., ZHANG Q., LUO S. *Error calibration of three axis magnetometer based on Gauss-Newton iteration algorithm* // Chinese Journal of Scientific Instrument. – 2013 – № 34(7). – P. 1506-1511.

15. QIN G., GUNA X.Y., LI W.S. *Compensation method of magnetic field error of three-dimensional vector based on ellipsoid compensation* // Electronic Measurement Technology. – 2018. – № 41(2). – P. 34-39.
16. WU Y., PEI L. *Gyroscope calibration via magnetometer* // IEEE Sensors Journal. – 2017. – № 17(16). – P. 5269-5275.
17. WU Y., ZOU D., LIU P. *Dynamic magnetometer calibration and alignment to inertial sensors by Kalman filtering* // IEEE Transactions on Control Systems and Technology. – 2018. – № 26(2). – P. 716-723.
18. YANG B.F., FAN B.Y., XU J.M. *Research on error compensation in geomagnetic field measurement based on least squares* // Journal of Air Force Engineering University. – 2017. – № 18(6). – P. 34-39.
19. YIN G., ZHANG Y.T., FAN H.B., ZHANG G., REN G.Q. *Linear calibration method of magnetic gradient tensor system* // Measurement. – 2014. – № 56. – P. 8-18.
20. ZHANG G., ZHANG Y.T., YIN G., REN G.Q., CHEN J.W. *The calibration method of magnetic tensor system based on linear error model* // Journal of Jilin University. – 2015 – № 45(3). – P. 1012-1016.
21. ZHOU N.B., WANG Y.B., WANG Q. *A brief review of geomagnetic navigation technology* // Journal of Navigation and Positioning. – 2018. – № 6(2). – P. 15-19.

TECHNOLOGY OF BENCH CALIBRATION OF TENSOR MAGNETOGRADIENT MEASUREMENT SYSTEMS

Boris Pavlov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (pavlov@ipu.ru).

Evgeny Karshakov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (karshak@mail.ru).

Dmitry Goldin, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. of Science (goldind@ipu.ru).

Andrey Volkovitsky, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (avolkovitsky@yandex.ru).

Abstract: A technology for bench calibration of a tensor magnetogradient measuring system is proposed. The proposed algorithms are based on assessing the influ-

ence of a reference magnetic source, described by the spatial distribution of the scalar magnetic potential, on the calibrated magnetogradiometer. Algorithms have been developed for additional calibration of vector sensors, which must be performed at a point with a minimum magnetic field gradient or in a solenoidal field. An algorithm has been developed for estimating the position of the base sensor, which consists of sequential rotations of the magnetogradient measuring system around its center with a stationary calibrated field source. An algorithm has been developed for estimating the direction of the dipole moment vector for a known position of the sensor relative to the field source. An algorithm has been developed for estimating the position of vector sensors relative to the base one. An algorithm for calibration technology for a tensor magnetogradiometer has been developed. The implementation of the described calibration technology in conjunction with the calibration technology of existing magnetic induction sensors made it possible to ensure the calibration of all parameters of the magnetogradient measuring system and the determination of the exact relative position of the sensors and the relative orientation of all sensitivity axes.

Keywords: calibration, tensor magnetogradiometers, magnetogradient measuring system.

УДК 621.317.44

ББК 31.222

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии*

*Поступила в редакцию
Опубликована*