

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 53.087.92

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ МАГНИТОНАВИГАЦИОННЫХ МИКРОТЕСЛАМЕТРОВ

А. Н. Тихомиров, О. В. Гасанов, А. В. Белоцерковский

Тверской государственный университет
Лаборатория магнитоэлектроники

Рассмотрен метод полной полевой коррекции погрешностей магнитонавигационного трёхкомпонентного микротесламетра, обусловленных смещением нуля, неточностями коэффициента преобразования и ориентации элементов, а также совместным влиянием природных и техногенных факторов. Продемонстрированы эффективные возможности компенсации этих погрешностей программными средствами.

Ключевые слова: *magnetic navigation, magnetometry, weak magnetic fields*

1. Введение. Современные инклинометрические навигационные системы обычно оснащаются двух- или трёхкомпонентными датчиками магнитного поля, с помощью которых в совокупности с акселерометрами определяются угловые параметры пространственной ориентации этих систем [1–5]. Наиболее актуальным является диапазон геомагнитных полей 20...80 мкТл, в котором ведутся разнообразные исследования, связанные с магнитной разведкой, поиски рудных тел различной природы, археологические исследования, многочисленные виды военных разведок, таких, как обнаружение подводных лодок и захороненных боеприпасов, поиски затонувших кораблей, создание охранных барьерных линий, в технике нефтедобычи и геологоразведки при направленном бурении скважин со сложным профилем, с большим углом наклона и отходом от вертикали, в робототехнике и многое другое [6–11].

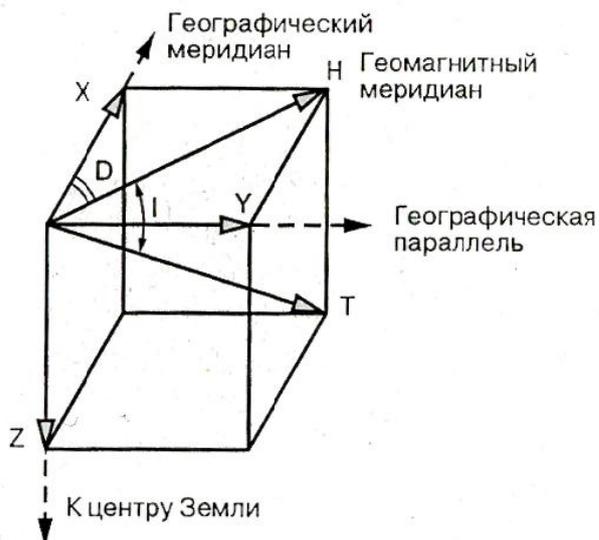
Важной особенностью магнитного поля Земли является его вариационная изменчивость. Естественные вариации магнитного поля существенно ограничивают возможность использования его модельных представлений в качестве априорной информации. Кроме того, значительные техногенные вариации поля создаются различными магнитными массами и электрическими токами, находящимися и действующими как в окружающем пространстве, так и непосредственно

на подвижной измерительной платформе вблизи чувствительного элемента микротесламетра.

Минимизация и коррекция показаний соответствующей магнитоизмерительной аппаратуры с учётом природных и техногенных факторов является необходимым условием успешного применения методов магнитной навигации. Развитию этих методов способствует значительный прогресс в разработках новых типов твёрдотельных магнитных датчиков, в частности, магниторезисторных плёночных преобразователей [12–15]. Магниторезисторные плёночные преобразователи обладают свойством ориентационной зависимости показаний и близкой к линейной передаточной характеристикой в слабых магнитных полях, имеют малые размеры и малую потребляемую мощность. Их чувствительность превосходит чувствительность преобразователей Холла и приближается к чувствительности феррозондовых (магнитомодуляционных) датчиков. Они изготавливаются методами микроэлектронной технологии, освоенными рядом специализированных фирм (Honeywell, Siemens). По совокупности указанных факторов можно рассчитывать на успешное применение магниторезисторных датчиков в различных магнитонавигационных приборах, при этом немаловажным фактором является наличие современных быстродействующих недорогих микропроцессоров, позволяющих в режиме реального времени выполнять сложные вычисления, проведение которых ранее было затруднительно.

В связи с изложенным в настоящей работе проводится анализ и исследуются возможности адаптивной программно-управляемой компенсации погрешностей компонентных магнитонавигационных микротесламетров на основе магнитоанизотропных резисторных микросборок.

2. Общие характеристики магнитного поля Земли. Магнитное поле Земли в каждой точке пространства характеризуется вектором поля \mathbf{T} , модуль и направление которого определяются тремя составляющими X , Y и Z (северной, восточной и вертикальной) в прямоугольной правой системе координат, или тремя элементами Земного поля: горизонтальной составляющей вектора \mathbf{T} , магнитным склонением (magnetic declination, magnetic variation) D (угол между \mathbf{T} и плоскостью географического меридиана) и магнитным наклонением I (magnetic inclination) (угол между \mathbf{T} и плоскостью горизонта) (рис. 1).



Р и с . 1. Составляющие магнитного поля Земли

Магнитное склонение положительно, если стрелка магнитного компаса отклоняется в восточную сторону относительно северного полюса, и отрицательно в случае отклонения на запад. Магнитное наклонение положительно в северном полушарии и отрицательно в южном [16–19]. Коэффициенты магнитного склонения должны быть учтены для определения истинного направления на географический полюс и вычисления географических координат. Карта изолиний коэффициентов магнитного склонения для земного шара представлена на рис. 2.

В электронных магнитных компасах коэффициенты магнитного склонения считываются из Flash-памяти. Значения коэффициентов определяются исходя из знания координат местности.

Основной (около 99 %) вклад в полное земное поле создаётся постоянным полем, которое связывают с процессами в жидком металлическом ядре Земли. Основное поле испытывает лишь медленные вековые вариации порядка десятков нТ за год. Переменное магнитное поле (~1 %), порождаемое токами в магнитосфере и ионосфере, более неустойчиво. Наблюдаются периодические солнечно-суточные и лунно-суточные магнитные вариации с амплитудами 30...70 и 1...5 нТ. Кроме того, прорывы заряженных частиц в магнитосферу приводят к колебаниям магнитного поля в широком диапазоне частот от 10^{-5} до 10^2 Гц и амплитуд (от 10^{-7} до 10^{-11} Т).

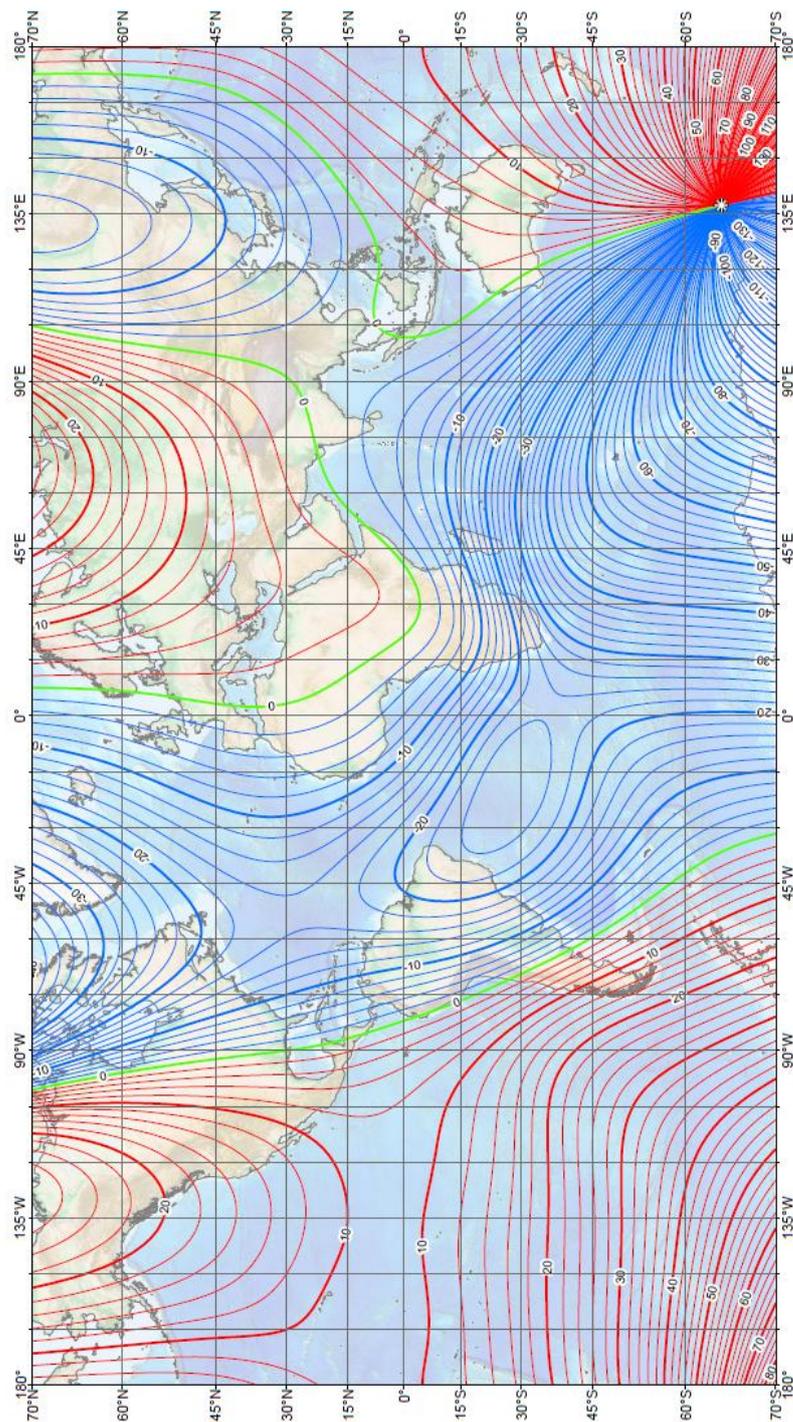


Рис. 2. Карта мира с изолиниями магнитного склонения поля Земли D , построенными с интервалом 2°

3. Характеристика направленности компонентных преобразователей. Магниторезисторные микросхемы относятся к группе преобразователей, характеризующихся наличием магнитной оси \mathbf{i}_m^0 , на которую проектируется вектор измеряемой величины и которая должна быть определена в пространстве и которая, как правило, жёстко связана с геометрическими осями преобразователя. Выходной сигнал $q = f(\mathbf{B}, \mathbf{i}_m^0)$ является функцией не только вектора \mathbf{B} , но и направления \mathbf{i}_m^0 , а значит пространственного расположения самого преобразователя [20]. Изменяя ориентацию преобразователя при неизменной ориентации и значении вектора \mathbf{B} , например, при последовательных поворотах на углы α_i в заданной плоскости, можно получить зависимость $q(\alpha)$ и, в конечном счёте, определить как значение, так и направление вектора внешнего поля, лежащего в плоскости угла поворота. На указанной плоскости зависимость $q(\alpha)$ обычно изображают в виде диаграммы направленности (рис. 3, а), которая является годографом вектора $\mathbf{i}_m^0 q_i$ [20].

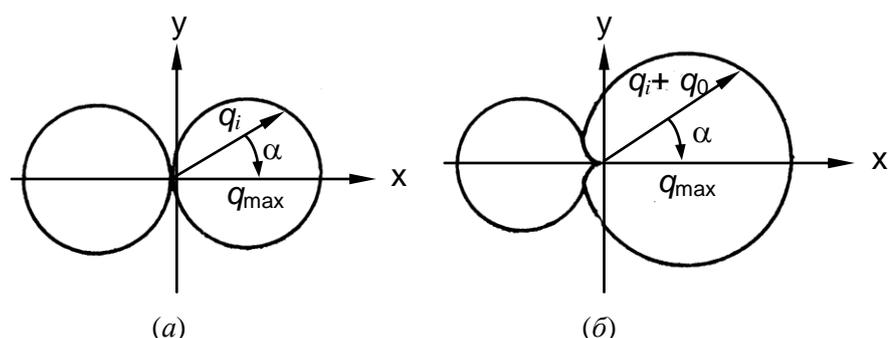


Рис. 3. Симметричная (а) и несимметричная (б) диаграммы направленности

Направление, при котором $q_i = q_{\max}$ называют максимумом диаграммы направленности.

Симметричные диаграммы направленности с двумя одинаковыми круговыми лепестками получают в тех случаях, когда передаточная характеристика линейна и отсутствует смещение нуля ($q_0 = 0$) (рис. 3, а). При симметрично-нелинейной функции преобразования и отсутствии смещения нуля диаграмма продолжает оставаться симметричной, хотя форма лепестков отличается от круга (рис. 3, б). Наконец, если даже функция преобразования линейна, но имеет место смещение нуля, диаграмма будет асимметричной с некруговыми лепестками.

Для недеформированной диаграммы справедливо выражение

$$q = q_{\max} \cos \alpha_i = kB_{\Omega} \cos(\mathbf{B}_{\Omega}, \mathbf{i}_m^0), \quad (1)$$

где k – коэффициент преобразования, B_{Ω} – проекция вектора \mathbf{B} на плоскость вращения преобразователя, \mathbf{i}_m^0 – его магнитная ось. Дифференцирование (1) по α даёт

$$\frac{dq}{d\alpha} = - = kB_{\Omega} \sin(\mathbf{B}_{\Omega}, \mathbf{i}_m^0). \quad (2)$$

Очевидно, что производная $dq/d\alpha$ есть не что иное, как дифференциальный коэффициент преобразования, являющийся мерой чувствительности преобразователя к изменению его ориентации относительно вектора \mathbf{B}_{Ω} . Из (2) видно, что наибольшую чувствительность к угловым изменениям прибор имеет тогда, когда $\mathbf{i}_m^0 \perp \mathbf{B}_{\Omega}$. Это обстоятельство целесообразно учитывать на практике при определении направления вектора путём сначала нахождения минимума диаграммы направленности, когда чувствительность преобразователя к изменению ориентации максимальна, а затем определения искомого направления простым поворотом на 90° . Этот же метод можно использовать при нахождении пространственного расположения самой магнитной оси \mathbf{i}_m^0 посредством измерения углов между направлением минимума диаграммы направленности и продольной геометрической оси преобразователя.

4. Анизотропные плёночные магниторезисторные микросборки. Анизотропные плёночные магниторезисторы AMR (AMR – anisotropic magnetoresistors) получили распространение лишь в последние годы. Магниточувствительный элемент AMR изготовлен из ферромагнитных плёнок, использующих анизотропный магниторезистивный эффект. Для создания AMR используют тонкие магнитоодноосные одно- и многослойные плёнки Ni-Co, Ni-Fe и других сплавов, изготовленных по специальной технологии напыления с наложением текстурирующего магнитного поля.

Удельное сопротивление ρ магниточувствительного элемента AMR зависит от направления вектора намагниченности плёнки. Относительное изменение

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 2 \frac{\rho_{\perp} - \rho_{\parallel}}{\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}},$$

где ρ_{\perp} и ρ_{\parallel} – значения удельного сопротивления в направлениях вдоль и поперёк вектора намагниченности, находится в пределах 2...5 %.

Сопротивление AMR элемента является квадратичной функцией измеряемого поля. Для линеаризации передаточной характеристики на поверхность ферромагнитной плёнки наносят орнамент из алюминиевых проводников в виде меандра, ориентированного под углом 45° к оси лёгкого намагничивания. Благодаря высокой электропроводности алюминия это приводит к шунтированию тока и изменению на 45° угла вращения вектора намагниченности в ферромагнитной плёнке по отношению к токовым линиям, соответственно возникает возможность работы в линейной части передаточной характеристики [12–14].

В коммерческих AMR датчиках обычно используют четыре подобных элемента, соединённых в схему моста Уитстона с взаимными ориентациями меандров под углами $\pm 45^{\circ}$. Это приводит к повышению чувствительности при одновременном снижении температурного дрейфа преобразователя.

Корректное функционирование AMR датчиков основано на обеспечении однодоменного состояния чувствительного элемента. Эффективным средством поддержания такого состояния является приём “flipping” (переключение, коммутирование) – периодическое перемагничивание магнитного элемента с помощью коротких импульсов тока, пропускаемых через плоский соленоид, смонтированный в том же микрочипе, что и сердечник. Этот дополнительный процесс не требует больших затрат мощности, т.к. длительность импульсов может быть выбрана малой, а скважность достаточно большой, но он обеспечивает значительное уменьшение дрейфа напряжения смещения.

Ещё одним ценным дополнением к AMR микросборке является второй плоский соленоид, с помощью которого можно обеспечить магнитную обратную связь. В режиме отрицательной обратной связи удаётся достичь дальнейшего уменьшения температурных дрейфов показаний и улучшения линейности передаточной характеристики.

В итоге в AMR микросборках достигаются высокие метрологические характеристики – чувствительность, температурно-временная стабильность нуля и др., сочетающиеся с малым энергопотреблением, малыми габаритами и небольшой стоимостью.

5. Погрешности магнитных компасов и методы их минимизации. Перечень основных источников погрешностей магнитных электронных компасов (микротесламетров) приведён в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Основные источники погрешностей электронных магнитных компасов

Постоянные или медленно меняющиеся	Изменяющиеся во времени
Смещение нуля первичных преобразователей; смещение нуля промежуточных и масштабных преобразователей; нелинейность и несимметричность передаточной характеристики; неортогональность первичных преобразователей; погрешности ориентации преобразователей на подвижной платформе; дополнительные погрешности, обусловленные действием посторонних полей	Промышленные и бытовые электросети, электрооборудование, трансформаторные подстанции, радиопередатчики, природные явления (солнечные бури, грозы)

На рис. 4 приведены диаграммы направленности двухкоординатной пары взаимно перпендикулярных косинусных преобразователей микротесламетра в произвольных относительных единицах. Для идеального случая (рис. 4, а) смещение нуля отсутствует, коэффициент преобразования равен единице, а ошибка взаимной ориентации отсутствует. На рис. 4, а представлены в полярных координатах положительный и отрицательный лепестки диаграмм направленности X- и Y-преобразователей. Одновременно представлена и кривая результирующего поля, рассчитанного по выходным сигналам этих преобразователей. Значение этого поля определяется корнем квадратным из суммы квадратов сигналов X- и Y-преобразователей. В идеальном случае эта кривая должна представлять собой окружность единичного радиуса, так как в известном и неизменном однородном поле его модуль не зависит от ориентации преобразователей.

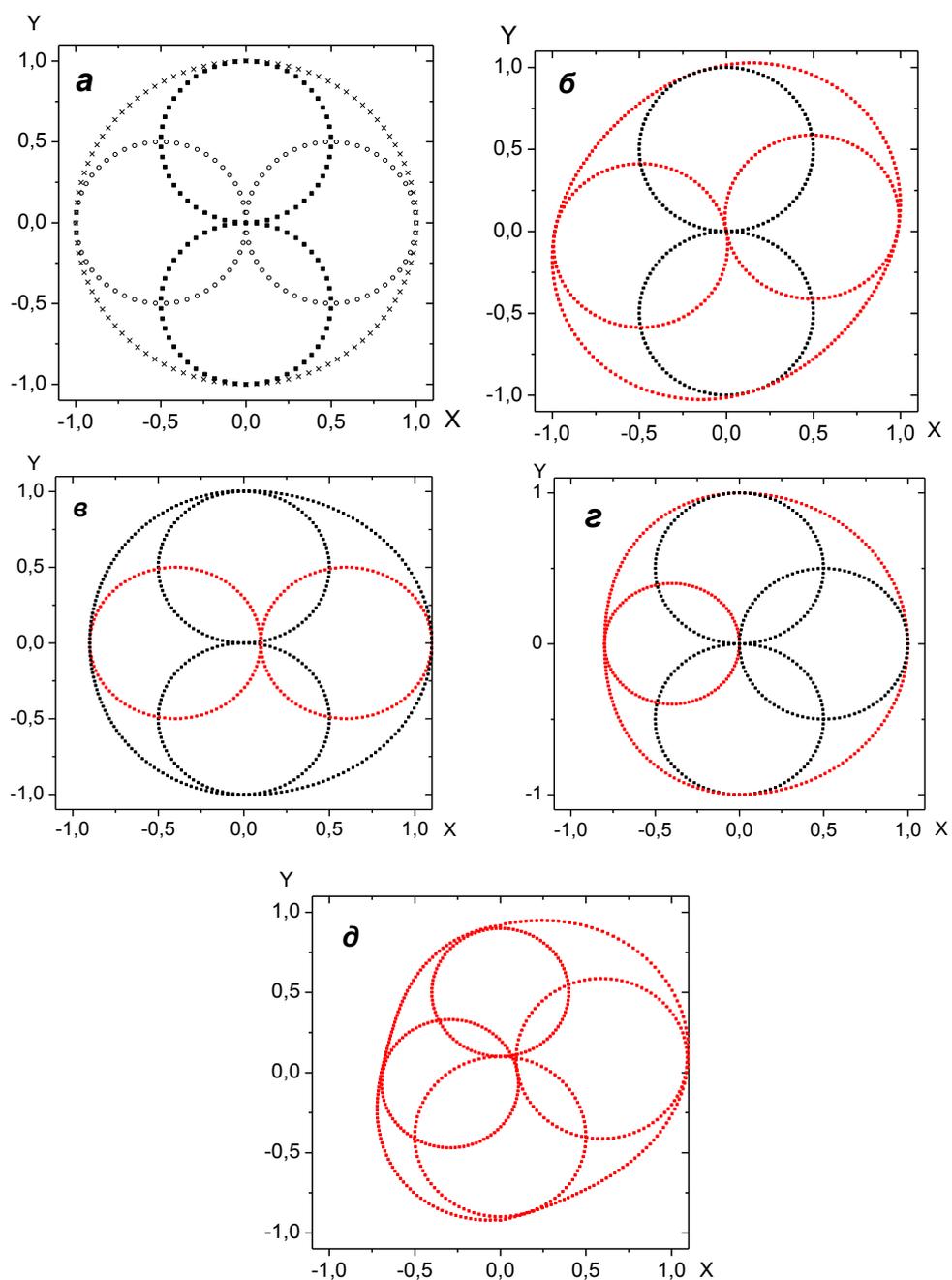


Рис. 4. Диаграммы направленности двухкоординатного микротесламетра. (а) идеальный случай; (б) поворот преобразователя X на 10° ; (в) смещение нуля X на 0,1; (г) изменение масштаба X на 0,2; (д) комбинированный эффект изменения масштабов X и Y на 0,2, смещения нуля X на 0,2 и поворота на 10°

Поведение этой кривой результирующего поля при наличии различных погрешностей составляет основу используемого в данной работе метода полной полевой калибровки (ППК) (total field calibration technique) [21].

Погрешность ориентации

Ориентация преобразователя обычно определяется путём установки идеальной магнитной оси в строго перпендикулярное положение по отношению к измеряемому полю. Если смещение нуля и погрешность определения коэффициента преобразования скорректированы, любое оставшееся отличие выходного сигнала датчика от идеального значения (рис. 4, б) используется для расчёта погрешности определения ориентации. Этот способ имеет тот недостаток, что любая погрешность ориентации фиксирующего поворотного устройства вызывает такую же погрешность определения ориентации. Метод ППК [21] ослабляет требования к точности фиксирующего устройства, что значительно облегчает процесс градуировки.

Смещение нуля (рис. 4, в)

Смещение нуля (показание средства измерений, отличное от нуля при нулевом входном сигнале) определяется как алгебраическая сумма значений выходных сигналов в точках, разнесённых строго на 180° . Если при этом вследствие погрешностей позиционирования датчика какая-либо из этих точек будет задана с ошибкой, то "скорректированный" выходной сигнал будет характеризоваться смещением нуля, зависящим от погрешности ориентации.

Коэффициент преобразования (чувствительность) (рис. 4, г)

Коэффициент преобразования (отношение изменения выходного сигнала к вызывающему его изменению измеряемой величины) определяется по значениям выходного сигнала в двух точках, лежащих строго на осях положительных и отрицательных значений выходного сигнала путём приложения внешнего поля в двух взаимно противоположных направлениях. Коэффициент преобразования определяется сравнением выходных сигналов для этих точек с абсолютным значением приложенного эталонного поля. Здесь, как и ранее, погрешности позиционирования датчика вызывают погрешность определения коэффициента преобразования.

Дополнительные погрешности, обусловленные посторонними полями

Посторонние источники магнитного поля, к числу которых относятся различные ферромагнитные тела, а также электрические токи,

могут вносить серьезные погрешности в оценки параметров поля Земли. В практике морской навигации сложился подход к анализу этих погрешностей на основе выделения двух типов "судового железа" – абсолютно "твёрдого" и абсолютно "мягкого" [22, 23]. Остаточная намагниченность \mathbf{M}_r первого из них является постоянной или медленно меняющейся величиной; намагниченность второго типа возникает под действием внешнего поля Земли и обратимо изменяется при изменениях поля с постоянным коэффициентом (обратимая восприимчивость χ_r). Другими словами, принимается, что в каждом элементе объёма "судового железа" выполняется соотношение

$$\mathbf{M} = \chi_r \mathbf{H} + \mathbf{M}_r,$$

или

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{B}_r,$$

где \mathbf{H} и \mathbf{B} – соответственно вектора напряжённости (А/м) и индукции (Т) магнитного поля Земли, \mathbf{B}_r – остаточная индукция, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Линеаризация начального участка кривой намагничивания (пренебрежение гистерезисными эффектами) может являться приемлемой для слабого внешнего поля, каковым является поле Земли. Однако при этом необходимо учитывать, что в разомкнутой магнитной цепи относительная магнитная проницаемость тела зависит от его формы (направления намагничивания) и может существенно отличаться от относительной магнитной проницаемости вещества μ [20, 24].

Матрица симметричного тензора относительной магнитной проницаемости тела μ^* имеет вид

$$[\mu^*] = \begin{bmatrix} \mu_x^* & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y^* & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z^* \end{bmatrix},$$

где μ_x^* , μ_y^* и μ_z^* – проницаемость тела в направлениях его главных осей, с которыми связана система координат x, y, z . Каждая компонента тензора μ^* вычисляется по формуле

$$\mu_i^* = f(\mu, N) = \frac{\mu}{1 + N_i(\mu - 1)},$$

где μ – относительная магнитная проницаемость вещества (предполагается изотропной), N_i – коэффициенты размагничивания, и $i = x, y, z$ – индексы соответствующих направлений.

На рис. 4 показаны подлежащие корректировке характерные искажения формы годографа вектора земного поля, вызванные внешними магнитотвёрдыми и магнитомягкими источниками

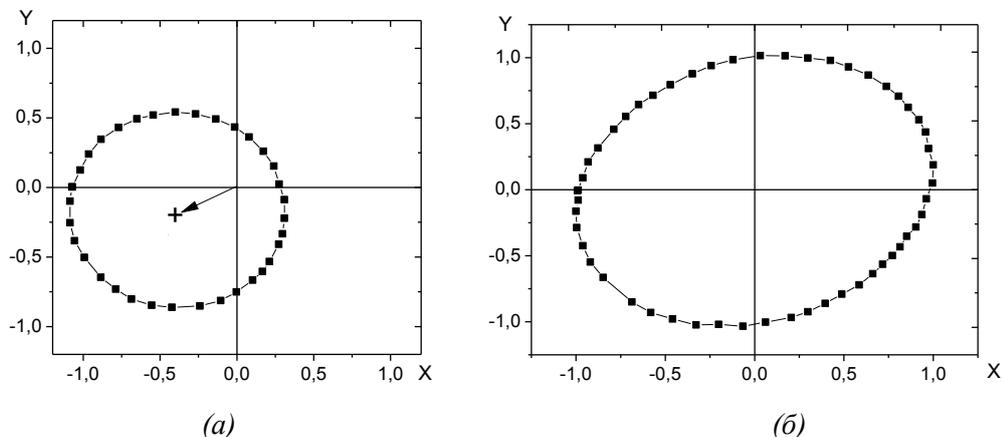


Рис. 5. Смещение общей точки (а) и эллиптические искажения годографа вектора земного поля в плоскости горизонта (б) при воздействии абсолютно «твёрдого» (а) и абсолютно «мягкого» постороннего тела (б)

6. Зоны отклонения. На рис. 6 представлена диаграмма результирующего поля для двухкомпонентного датчика, на которой отмечены центры восьми важных зон.

В зонах с центрами на оси x преобладает влияние смещения нуля и погрешностей преобразования X -датчика, а в зонах с центрами на оси y – то же для Y -датчика. В четырёх диагональных зонах преобладает влияние ошибок ориентации X - и Y -датчиков.

Смещение нуля, коэффициент преобразования и ориентацию датчика можно определить, находя путём решения уравнений такие значения этих параметров, которые минимизируют отклонения поля в указанных зонах.

Идеальными компонентами выходного косинусоидального сигнала трехкомпонентного косинусоидального датчика поля являются:

$$\begin{aligned} X &= |\mathbf{V}| \cos \alpha_x \\ Y &= |\mathbf{V}| \cos \alpha_y \\ Z &= |\mathbf{V}| \cos \alpha_z \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{V} – вектор измеряемого поля, $i = x, y, z$ – углы между осями i и вектором \mathbf{V} , а X, Y, Z – идеальные выходные сигналы в единицах

измеряемого поля. В случае взаимно ортогональных осей x, y, z выполняется соотношение $|\mathbf{V}| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$.

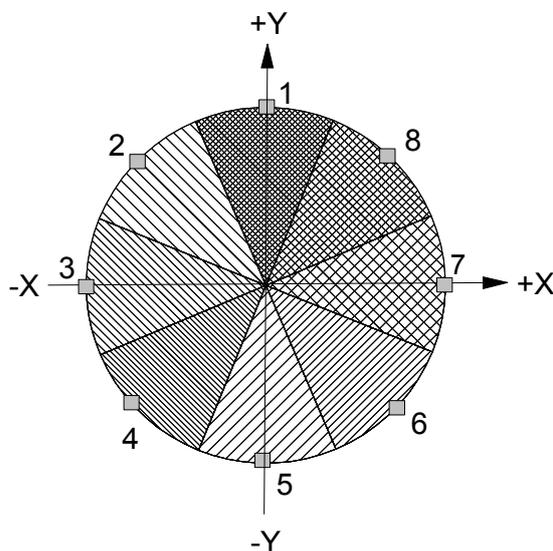


Рис. 6. Характерные чувствительные зоны на диаграмме результирующего поля

Реальные датчики будут иметь погрешности из-за смещения нуля, неточности коэффициента преобразования и ориентации.

$$\begin{aligned} M_x &= S_x [X + Y \cos \alpha_{xy} + Z \cos \alpha_{xz} + \delta_x] \\ M_y &= S_y [Y + X \cos \alpha_{yx} + Z \cos \alpha_{yz} + \delta_y] \\ M_z &= S_z [Z + X \cos \alpha_{zx} + Y \cos \alpha_{zy} + \delta_z] \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ – смещение нуля в единицах поля, S_x, S_y, S_z – коэффициенты преобразования для каждого датчика в единицах выходного сигнала на единицу поля, α_{ij} – углы между реальными i и идеальными осями j , M_x, M_y, M_z – реальные выходные сигналы датчиков.

Систему уравнений (4) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} X &= \frac{M_x}{S_x} - \delta_x - Y \cos \alpha_{xy} - Z \cos \alpha_{xz}, \\ Y &= \frac{M_y}{S_y} - \delta_y - X \cos \alpha_{yx} - Z \cos \alpha_{yz}, \\ Z &= \frac{M_z}{S_z} - \delta_z - X \cos \alpha_{zx} - Y \cos \alpha_{zy}. \end{aligned} \quad (5)$$

Пренебрегая малыми членами, запишем

$$\begin{aligned} X &= \frac{M_x}{S_x} - \delta_x, \\ Y &= \frac{M_y}{S_y} - \delta_y, \\ Z &= \frac{M_z}{S_z} - \delta_z. \end{aligned} \quad (6)$$

С учётом (5) и (6) можно записать уравнения коррекции сигналов датчика в следующем виде:

$$\begin{aligned} X &= \frac{M_x}{S_x} - \delta_x - \left[\frac{M_y}{S_y} - \delta_y \right] \cos \alpha_{xy} - \left[\frac{M_z}{S_z} - \delta_z \right] \cos \alpha_{xz}, \\ Y &= \frac{M_y}{S_y} - \delta_y - \left[\frac{M_x}{S_x} - \delta_x \right] \cos \alpha_{yx} - \left[\frac{M_z}{S_z} - \delta_z \right] \cos \alpha_{yz}, \\ Z &= \frac{M_z}{S_z} - \delta_z - \left[\frac{M_x}{S_x} - \delta_x \right] \cos \alpha_{zx} - \left[\frac{M_y}{S_y} - \delta_y \right] \cos \alpha_{zy}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для целей настоящего обсуждения учтём, что α_{xy} , α_{zx} , α_{zy} могут быть определены независимо. Располагая измеренными значениями модуля $|\mathbf{V}|$ и используя уравнения (3) и (6) можно проанализировать данные, полученные при вращении прибора вокруг трех осей и найти S_x , S_y , S_z , δ_x , δ_y , δ_z , α_x , α_y , α_z следующим образом.

Прежде всего, запишем для измеренных данных

$$\mathbf{M}^{i,n} = [M_x^{i,n}, M_y^{i,n}, M_z^{i,n}]$$

где $\mathbf{M}^{i,n}$ – вектор, построенный по трем измеренным значениям M_x , M_y , M_z , полученным при вращении вокруг оси i в n -ой точке вращения.

Кроме того, запишем

$$\mathbf{C}_{i,n} = [X_{i,n}, Y_{i,n}, Z_{i,n}].$$

Эта запись обозначает вектор «скорректированных» выходных сигналов, рассчитанных исходя из $M_{i,n}$ по уравнениям (5).

Учтём также, что $|\mathbf{C}_{i,n}| = \sqrt{X_{i,n}^2 + Y_{i,n}^2 + Z_{i,n}^2}$.

Основная идея метода заключается в том, что $|C_{i,n}| = |V|$, для всех i и n , когда идеально линейный датчик идеально компенсирован, или в максимальной степени приближены друг к другу, если датчик имеет некоторую нелинейность. Этот процесс является итерационным, поэтому с каждым циклом итерационный процесс, так что с каждым итерационным циклом все точнее определяется смещение нуля, коэффициент преобразования и коэффициент взаимной ориентации.

Алгоритм коррекции результатов измерений описывается следующими действиями.

Шаг 1. Принять S_x, S_y, S_z равными идеальным значениям, положить $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ и $\alpha_{xy}, \alpha_{zx}, \alpha_{zy}$ равными нулю.

Шаг 2. Используя данные, полученные при вращении датчика вокруг оси z , при котором значения X проходят через положительный $M_{1,z}$ и отрицательный $M_{1,z}$ максимумы, найти такие решения для δ_x и S_x , при которых $|C_{1,z}| = |C_{5,z}| = |V|$

Шаг 3. Используя данные, полученные при вращении датчика вокруг оси z , при котором значения Y проходят через положительный $M_{3,z}$ и отрицательный $M_{7,z}$ максимумы, найти такие решения для δ_y и S_y , при которых $|C_{3,z}| = |C_{7,z}| = |V|$

Шаг 4. Используя данные, полученные при вращении датчика вокруг оси y , при котором значения Z проходят через положительный $M_{1,y}$ и отрицательный $M_{5,z}$ максимумы, найти такие решения для δ_z и S_z , при которых $|C_{1,z}| = |C_{5,z}| = |V|$

Шаг 5. Используя четыре набора данных, полученных при вращении датчика вокруг оси z при ориентациях X - и Y -датчиков под углами $\sim 45^\circ$ к вектору поля, решить систему уравнений для $M_{2,z}, M_{4,z}, M_{6,z}$ и $M_{8,z}$ относительно α_x так, чтобы значения $|C|_{2,z}, |C|_{4,z}, |C|_{6,z}$ и $|C|_{8,z}$ были наилучшим образом приближены друг к другу.

Шаг 6. Так же, как в шаге 5, решить систему уравнений для $M_{2,y}, M_{4,y}, M_{6,y}$ и $M_{8,y}$ относительно α_{xz} .

Шаг 7. Так же, как в шаге 5, решить систему уравнений для $M_{2,x}, M_{4,x}, M_{6,x}$ и $M_{8,x}$ относительно α_{yz} .

Шаг 8. Проверить все S_i, δ_i и α_i и убедиться в их достаточной сходимости.

Заключение. Рассмотренный метод полной полевой калибровки даёт набор значений поправок для коррекции погрешностей магнитонавигационного трёхкомпонентного микротесламетра,

обусловленных смещением нуля, неточностей коэффициента преобразования и ориентации элементов. В результате магнитоизмерительный модуль оказывается откалиброванным как полная система для коррекции как ошибок, вызываемых внутренними причинами, так и совместным влиянием внутренних причин и воздействий окружающей среды. Реализация метода не связана с использованием прецизионной аппаратуры и может проводиться в полевых условиях.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры для инновационной России» на 2009–2013 годы и с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Смирнов Б.М. Метод измерения параметров магнитного поля с подвижной платформы // Измерит. техника. 1992. № 5. С. 55–57.
2. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987.
3. Бледнов В.А. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя // УФН. 1994. Т. 164, №9. С. 1001–1005.
4. Бледнов В.А. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах (основы теории разделения полей) // УФН. 1997. Т. 167. С. 1113–1118.
5. Тихомиров А.Н. Картирование рабочей площади для испытаний магнитонавигационных преобразователей // Вестник ТвГУ. Серия Физика. 2011. Вып. 14. С. 47–55.
6. Александров Е.Б. Современное состояние техники измерения модуля слабых магнитных полей от нуля до десятка эрстед. УФН. 2001. Т.171. №11. С. 1263.
7. Афанасьев Ю.В., Бондаренко С.И., Козлов А.Н., Пак В.П., Шеремет В.И. Магнитоизмерительные приборы для геофизических и других исследований // Метрология. 1989. № 10. С. 3–16.
8. Самарин А. Мультисенсорные навигационные системы для локального позиционирования // Современная электроника. 2006. №6. С.10–17.
9. Calusdian J., Bachmann E.R., McGhee R.B. Estimation of human foot motion during normal walking using inertial and magnetic sensor measurements // IEEE Trans. Instrum. Measurement. 2012. Ussue 99. P. 1–14.

10. Chao H., Coopmans C., Di L., Chen Y.Q. A comparative evaluation of low-cost IMUs for unmanned autonomous systems // 2010 IEEE Intern. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems/ University of Utah, UTA, USA, Sept. 5–7, USA.
11. Lai Y.-C. Jan S.-S., Hsiao F.-B. Development of a low-cost attitude and heading reference system using a three-axis rotating platform // *Senspr.* 2010. V/ 10/ P. 2472–2491.
12. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. В 2-х томах. ДМК Пресс, 2002.
13. M.J. Caruso. Applications of magnetoresistive sensors in navigation system // *Sens. Actuators/* 1997. SAE SP-1220 p.15–21.
14. Ripka P. Advances in magnetic field sensors // *IEEE Sensors Journ.* 2010. V. 10. No. 6.
15. Stutzke N.A. Low-frequency noise measurements on commercial magnetoresistive magnetic field sensors // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. Art. 10Q107.
16. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л., 1978.
17. Стейси Ф.Д. Физика Земли. М., 1972.
18. NOAA Technical Report: The US/UK World Magnetic Model for 2010–2015 // www.noaa.gov/geomag/WMM
19. Macmillan S., Maus S. International geomagnetic reference field—the tenth generation // *Earth Planets Space.* 2005. V. 57. P. 1135–1140.
20. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкина А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
21. Estes R., Walters P. Improvement of Azimuth Accuracy by Use of Iterative Total Field Calibration Technique and Compensation for System Environment Effects // *SPE* 19546. 1989. 12 pages.
22. Крылов А.Н., Королевич В.С. Магнитные компасы. М.-Л.: Морской транспорт, 1949.
23. Blednov V.A. Basic principles for determining the components of the Earth's magnetic field on moving ferromagnetic objects (fundamentals of field separation theory) // *Physics Uspekhi.* 1997. V. 40(10). P. 1061–1065.
24. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. М.-Л.: ОНТИ, 1934.

**PROGRAM-CONTROLLED COMPENSATION OF
INCLINOMETRIC MAGNETIC NAVIGATION
MICROTESLAMETER ERRORS**

A. N. Tikhomirov, O.V. Gasanov, A.V. Belotserkovsky

Tver State University
Laboratory of Magnetoelectronics

A method of total field correction of the errors of a three-component microteslameter due to zero offset, inaccuracies of the transfer function and misalignment of the sensor elements are considered including the effects of natural and technogenic factors. Effective compensation of these errors by program-controlled means are demonstrated.

Keywords: *magnetic navigation, magnetometry, weak magnetic fields*

Об авторах:

ТИХОМИРОВ Алексей Николаевич – аспирант кафедры прикладной физики, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33, *e-mail:* tikhomirov.40@mail.ru;

ГАСАНОВ Олег Валерьевич – аспирант кафедры прикладной физики ТвГУ, *e-mail:* oleg.gasanov-1988@mail.ru

БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Андрей Владленович – доктор физико-математических наук, профессор ТвГУ.