

УДК 538.6

**СПОСОБ БЫСТРОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХ
КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ОСНОВАННЫЙ
НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДУЛЬНОГО M_x -МАГНИТОМЕРА
С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

© 2006 г. А. К. Вершовский

Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 11.10.2005 г.

Предложен и математически обоснован способ одновременного измерения трех компонент вектора земного магнитного поля с использованием M_x -магнитометра с оптической накачкой, помещенного в симметричную систему магнитных колец. Способ характеризуется высокой абсолютной точностью (порядка 0.1 нТл при времени измерения 0.1 с). Кратковременная чувствительность измерения определяется чувствительностью M_x -магнитометра.

PACS: 07.60

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе предлагается новое решение неизменно актуальной задачи одновременного измерения трех компонент вектора земного магнитного поля – решение, характеризующееся высокой абсолютной точностью при малом времени измерения.

Метрологам хорошо известно, что любую компоненту магнитного поля можно измерить с высокой точностью, измеряя модуль поля – если предварительно с помощью системы магнитных колец скомпенсировать компоненты поля, ортогональные измеряемой компоненте. При таком измерении не требуется высокая точность компенсации ортогональных компонент, поскольку в соответствии с законом сложения векторов вклад малых поперечных компонент в модуль поля в присутствии большой некомпенсированной измеряемой компоненты подавляется на несколько порядков.

Однако построение на этом принципе измерительных приборов затруднено тем, что полная компенсация двух компонент поля, необходимая для измерения третьей компоненты, требует создания относительно сильных компенсирующих магнитных полей. Соответственно процедуры измерения всех трех компонент поля посредством данного метода должны быть разделены либо в пространстве, либо во времени. В первом случае необходимы три системы магнитных колец, разнесенные на достаточное расстояние (несколько метров или десятки метров) во избежание взаимных помех. Во втором случае требуется осуществлять быстрое переключение компенсирующих магнитных полей в одной системе магнитных колец. При этом необходим также быстродей-

ствующий измеритель модуля магнитного поля, способный отслеживать скачки модуля магнитного поля, возникающие при переходе от измерения одной компоненты к измерению другой.

В связи с этим трехкомпонентные приборы, как правило, используют другой принцип: измеритель модуля магнитного поля в них также помещен в систему магнитных колец, назначение которой, однако, не компенсация поперечных компонент, а создание калиброванных последовательных отклонений магнитного поля от его начального направления [1–8]. В качестве измерителя модуля магнитного поля в таких устройствах используются как протонные магнитометры [4, 6], так и магнитометры с оптической накачкой [5, 7–9]. Переключение направления магнитного поля в таких устройствах может осуществляться как дискретно, так и непрерывно (в [9] описан прибор, в котором вектор суммарного поля осуществляет непрерывное вращение вокруг направления магнитного поля Земли).

Общим недостатком таких устройств является отсутствие абсолютности измерений. Имеется в виду, что в результате измерения здесь всегда вносит вклад совокупность калиброванных полей, отклоняющих вектор поля от его начального направления. Этот вклад, по порядку величины сопоставимый с величиной самого измеряемого поля, должен учитываться при обработке результатов измерения, однако он зависит от конфигурации катушек и силы тока в них, а следовательно – от температуры, влажности и целого ряда других факторов.

В данной работе предлагается способ абсолютного одновременного измерения трех компонент вектора магнитного поля с помощью систе-

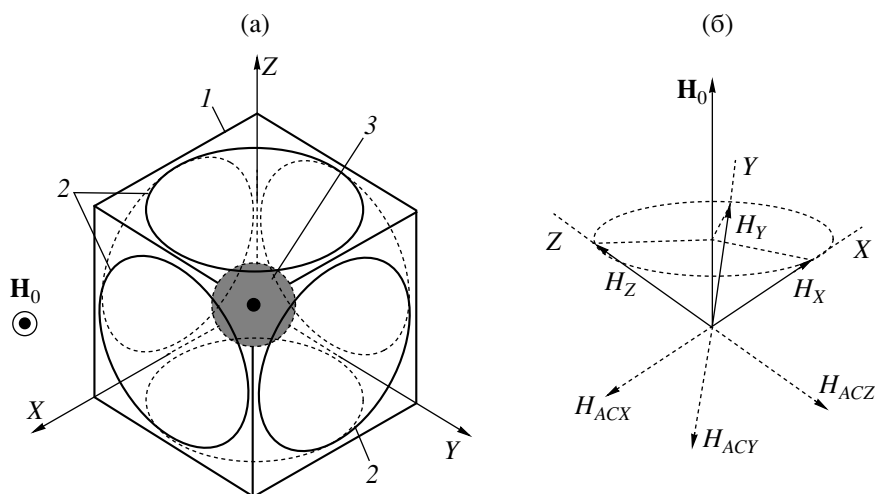


Рис. 1. а – датчик в симметричной трехкомпонентной системе колец. 1 – кубический каркас системы колец, 2 – кольца (катушки с током), 3 – датчик. Ось датчика и вектор измеряемого поля \mathbf{H}_0 направлены перпендикулярно к плоскости рисунка. б – проекции H_x , H_y , H_z измеряемого магнитного поля \mathbf{H} и переменные компенсирующие поля в катушках H_{ACX} , H_{ACY} , H_{ACZ} (максимальные значения). Ось датчика и вектор измеряемого поля \mathbf{H}_0 лежат в плоскости рисунка. Окружность в плоскости XYZ – годограф вектора суммарного магнитного поля.

мы магнитных колец и датчика-измерителя модуля поля. При этом предполагается, что каждая компонента измеряемого поля в процессе измерения изменяется не более, чем на 2% от значения модуля – условие, которому обычно удовлетворяет поведение вектора магнитного поля Земли. Под абсолютностью подразумевается то, что процесс измерения смещает измеряемый параметр, т.е. компоненту поля, на величину, не превышающую точность измерения вариации модуля магнитного поля датчиком. При этом, разумеется, сохраняется вопрос об абсолютной точности показаний датчика. Однако этот вопрос хорошо исследован применительно к датчикам квантовых магнитометров: абсолютная погрешность лучших из них лежит в области 0.1–0.01 нТл и практически не зависит от величины измеряемого поля [10]. В качестве датчика предлагается использовать цезиевый или калиевый магнитометр с оптической накачкой, отслеживающий осциллирующий сигнал поперечной намагниченности атомов в ячейке – так называемый M_x -магнитометр, характеризующийся высокой точностью и быстродействием. Суть метода заключается в создании в области датчика системы компенсирующих полей, гармонически изменяющихся таким образом, чтобы вектор суммарного магнитного поля в датчике вращался, сохраняя свою длину, вокруг начального направления магнитного поля, проходя в каждом цикле вращения через три положения, в каждом из которых две компоненты магнитного поля скомпенсированы с высокой точностью, а третья компонента не скомпенсирована совсем и может быть измерена. Предлагаемый метод пригоден для широкого диапазона по-

лей, но наиболее очевидно его применение для прецизионного измерения компонент земного поля – ввиду его однородности и относительной малости вариаций.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Датчик помещается в центр симметричной трехкомпонентной системы электромагнитных колец (катушек). Система ориентируется таким образом, чтобы и главная диагональ куба, вписанного в систему колец, и ось симметрии датчика (совпадающая с направлением распространения света накачки) были направлены вдоль магнитного поля Земли \mathbf{H}_0 (рис. 1а). Выбранная система координат жестко связана с осями системы колец. В этой системе координат все три компоненты вектора магнитного поля Земли в начальный момент времени равны по величине: $H_x = H_y = H_z = |\mathbf{H}_0|/\sqrt{3} = H_0$. Поле H_{ACi} в каждой катушке ($i = X, Y, Z$, индексы AC указывают на осциллирующие величины) изначально подбирается таким (рис. 1б), чтобы полностью компенсировать соответствующую компоненту поля Земли H_i . На практике начальный подбор полей и ориентация системы колец осуществляются на основе приблизительной априорной информации о векторе измеряемого поля, и в дальнейшем точная компенсация всех компонент автоматически осуществляется с помощью системы обратных связей.

При одновременном включении компенсирующих полей во всех трех катушках суммарное поле в датчике равно нулю. Выключение поля H_{ACi} в одной из катушек i ($i = X, Y, Z$) приводит к появ-

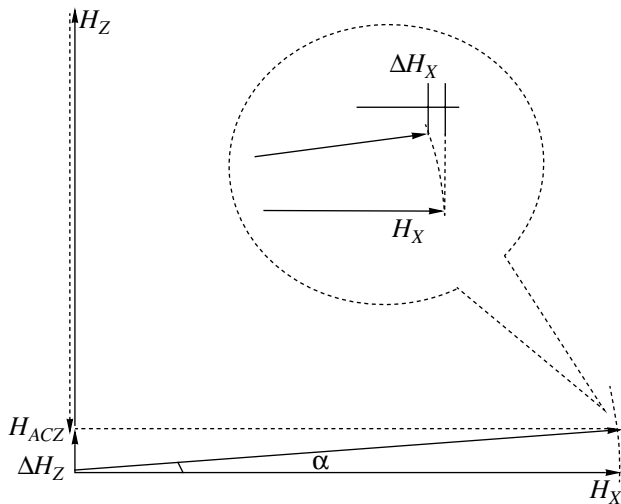


Рис. 2. Погрешность измерения компоненты поля H_X , обусловленная неточностью компенсации компоненты H_Z . ΔH_Z – остаточное поле по оси Z , ΔH_X – погрешность измерения компоненты H_X .

лению соответствующей некомпенсированной компоненты i поля, которая может быть измерена датчиком. Точность измерения при этом на несколько порядков выше точности компенсации ортогональных компонент поля, так как вклад от некомпенсированных ортогональных компонент поля пропорционален $(1 - \cos \alpha)$, где α – малый угол (рис. 2). Цикл таких измерений по $i = X, Y, Z$ даст полную информацию о трех компонентах поля, которая, в свою очередь, используется в реальном времени для уточнения компенсирующих полей $H_{ACX}, H_{ACY}, H_{ACZ}$ в катушках X, Y, Z – так организуются три системы обратной связи.

Следующий шаг развития предлагаемого подхода состоит в переходе от дискретных изменений поля к непрерывным или квазинепрерывным – мы заставляем поле непрерывно или квазинепрерывно (дискретно с небольшим шагом) вращаться таким образом, чтобы три точки на окружности вращения соответствовали рассмотренным выше случаям $H_{ACi} = 0$ ($i = X, Y, Z$). Вектор суммарного магнитного поля при этом все время отклонен на 35.2° от оси оптической накачки M_x -магнитометра. При этом обеспечивается непрерывность захвата за резонанс, а реальные измерения проводятся в трех точках на окружности вращения. Важно, что измерение компоненты H_i по-прежнему производится в момент, когда соответствующее компенсирующее поле H_{ACi} полностью выключено и включены только компенсирующие поля, ортогональные H_i , – так обеспечивается абсолютность измерения компонент. Для обеспечения точности компенсации ортогональных компонент поля предлагается использовать процеду-

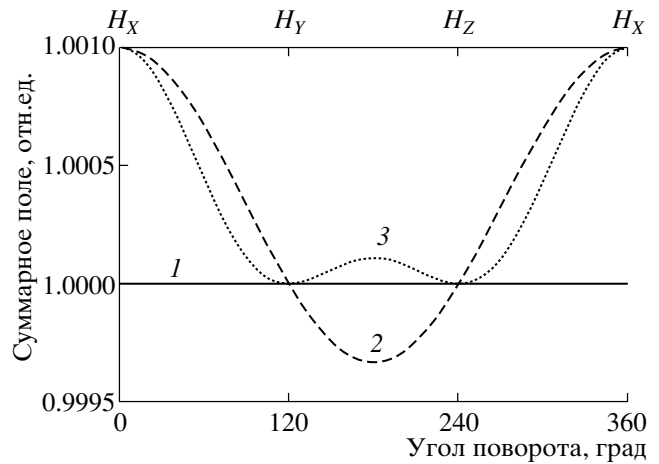


Рис. 3. Зависимость модуля вектора суммарного магнитного поля от угла поворота (график нормирован на H_0): 1 – при совпадении направления измеряемого поля с осью системы ($\Delta H_i = 0, \Delta H_{Mi} = 0$), 2 – при вариации X -компоненты измеряемого магнитного поля ($\Delta H_X = 1.001, \Delta H_{MX} = 0$), 3 – при отработке вариации системой обратной связи ($\Delta H_X = 1.001, \Delta H_{MX} = 1.001$).

ру самокалибровки по минимуму модуля поля при вариации компенсирующих полей.

В качестве рабочего вещества датчика может быть выбран калий (недостаток – большой размер рабочей кюветы и тем самым системы колец) либо цезий с маленькой ячейкой и относительно широкой асимметричной линией резонанса (недостаток – пониженная точность). Заметим, что возможная асимметрия линии резонанса приведет к появлению одинаковой ошибки измерения компонент и практически не повлияет на точность измерения направления вектора поля.

Оценим на примере измерения X -компоненты поля требования к точности компенсации поперечных компонент. Будем (здесь и далее) считать, что модуль измеряемого поля равен 50000 нТл, среднее значение любой компоненты поля $|\mathbf{H}_i| = |\mathbf{H}_0|/\sqrt{3} \approx 28867$ нТл, максимальная вариация компоненты поля составляет ± 1000 нТл, требуемая абсолютная точность прибора ± 0.1 нТл. Следовательно, ошибка, вносимая в измерение компоненты X неточностью компенсации компоненты Z (рис. 3), не должна превышать $\Delta H_X = 0.1$ нТл. Отсюда максимальная величина поля в Z -компоненте $\Delta H_Z = H_i \sin[\arccos(1 - \Delta H_X/H_X)] = 76$ нТл; при одновременном наличии двух не полностью компенсированных компонент $\Delta H_Y = \Delta H_Z = 54$ нТл. Иначе говоря, относительная ошибка компенсации поперечных компонент может достигать 1.8×10^{-3} . Это значит, что для изготовления системы колец может быть использован любой материал, обеспечивающий постоянство геометрической формы системы (ортогональности колец) – без

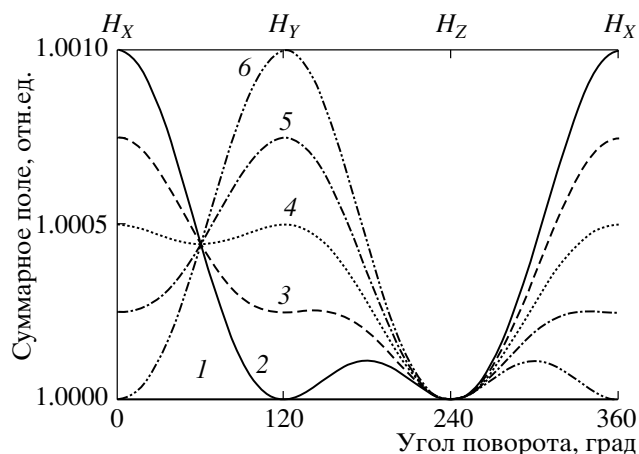


Рис. 4. Отклик системы на различные вариации компонент X , Y вектора измеряемого магнитного поля (график нормирован на H_0): 1 – отклонение вектора отсутствует, 2 – вариация X -компоненты поля, 3–5 – промежуточные варианты, 6 – вариация Y -компоненты поля.

особых требований к стабильности размера системы.

Прежде чем перейти к аналитическому описанию сигнала в системе и результатам численного моделирования, перечислим основные недостатки данного способа и возможные пути их устранения.

1. Требования к ортогональности катушек очень высоки: ограничение ошибки величиной 0.1 нТл приводит к требованию ортогональности осей колец на уровне 3×10^{-6} (3 мкм/м, или 0.6"), что, конечно, вряд ли достижимо. Следовательно, неортогональность колец в системе должна быть измерена после изготовления (либо должна измеряться периодически в процессе калибровки) и должна быть скомпенсирована электронным образом. Тогда оценка 0.6" будет относиться к вариациям углов между катушками в системе. Процедура калибровки систем, характеризующихся неидеальной ортогональностью осей, описана в [11].

2. Инерционность как магнитных колец, так и датчика приведет к задержке измерения магнитного поля и, как следствие, к фактическому смещению точек на окружности, в которых производится измерение. Негативное влияние этого эффекта не очень велико благодаря тому, что, как будет показано далее, в стационарной ситуации производная модуля поля по углу фазы вращения поля в этих трех точках равна нулю (рис. 4). В ситуации, когда от системы требуется высокое быстродействие, самый радикальный способ снизить влияние этого эффекта – создание условий, когда направление магнитного поля постоянно

совпадает с главной осью системы (см. п. 3 настоящего списка).

3. Постоянство модуля магнитного поля при его вращении сохраняется только при небольших угловых отклонениях измеряемого магнитного поля от оси системы колец. При больших угловых отклонениях поля увеличивается скорость изменения модуля поля при его вращении (рис. 3), что может привести к снижению точности измерения за счет инерционности системы и даже к неработоспособности датчика. Для устранения этого недостатка возможны:

а) непрерывная компенсация вариаций поля медленными (по сравнению с периодом вращения) компенсирующими полями H_{DCi} в катушках. При этом величина измеряемой компоненты поля определяется как по показаниям датчика, так и по величине тока в катушке, соответственно, строго говоря, теряется абсолютность метода. Однако в ситуации, когда вариации компонент магнитного поля Земли не превышают 2% (или 1000 нТл), введение таких компенсирующих полей приводит к требованию стабильности констант системы колец на уровне 10^{-4} , что легко осуществимо на практике.

б) использование механической сервосистемы. Этот способ не снижает абсолютность, но существенно более сложен, так как требуемая точность измерения поля на уровне 0.1 нТл на фоне ~50000 нТл подразумевает точность механического позиционирования лучшую, чем 0.4". Впрочем, технически это реально – подобные точности достигаются в приводах астрономических телескопов.

В обоих случаях дополнительные “медленные” системы обратной связи обеспечивают постоянство модуля суммарного магнитного поля во всех точках на окружности вращения. Близлежащие точки на окружности становятся равноценными. Это резко снижает требования к точности выбора точек на окружности, в которых производится измерение магнитного поля, и позволяет перейти от измерения магнитного поля в трех точках на окружности к измерению на трех сегментах окружности (см. далее).

4. Предложенный способ характеризуется пониженным отношением сигнал/шум, а следовательно, меньшей кратковременной чувствительностью. Это связано с тем, что измерение каждой компоненты происходит всего в одной точке на окружности вращения поля; следовательно, в случае квазинепрерывного вращения поля по окружности, состоящей из N точек, чувствительность в каждой компоненте падает по сравнению с чувствительностью модульного датчика в $N^{1/2}$ раз (предполагается, что чувствительность датчика ограничена дробовыми шумами фототока, характеризующимися гауссовой статистикой). Од-

нако в дальнейшем мы покажем, что эффективная область измерений может быть существенно расширена без снижения абсолютности.

5. Как известно [1], вращение магнитного поля с частотой ω вокруг оси M_x -датчика приводит к сдвигу измеряемой напряженности поля на величину $\pm\omega/\gamma$ (где γ – гиромагнитное отношение) в зависимости от направления вращения (гироскопический эффект). Однако, поскольку частота вращения известна, этот эффект может быть легко учтен без потери точности измерения.

ОПИСАНИЕ СИГНАЛА В СИСТЕМЕ

Рассмотрим сигнал в системе в отсутствие дополнительных систем компенсации вариаций поля. Закон изменения во времени компенсирующих полей H_{ACi} должен обеспечивать следующие условия.

1. Постоянство модуля полного поля при условии параллельности измеряемого поля главной оси системы.

2. Постоянство угловой скорости ω вращения вектора полного поля.

3. Наличие на окружности вращения трех точек, характеризующихся углами φ_i^0 (где $\varphi_x^0 = 0^\circ$, $\varphi_y^0 = 120^\circ$, $\varphi_z^0 = 240^\circ$, углы измеряются в плоскости XYZ , перпендикулярной к главной оси системы, по отношению к проекции на эту плоскость оси X), в каждой из которых одна компонента H_{ACi} равна нулю, а две другие компоненты по модулю равны соответствующим компонентам H_i и противоположны им по знаку, например, в точке $\varphi = \varphi_x^0 = 0^\circ$ $H_{ACX} = 0$, $H_{ACY} = -H_Y$, $H_{ACZ} = -H_Z$.

Легко показать, что всем этим условиям удовлетворяет выражение

$$H_{ACi}(t) = (2/3)[\cos \varphi_i(t) - 1]H_{Mi}, \quad (1)$$

где H_{Mi} – измеренное значение i -той компоненты поля (в идеале $H_{Mi} = H_i$),

$$\varphi_x(t) = \omega t, \quad \varphi_y(t) = \varphi_x(t) - \varphi_y^0,$$

$$\varphi_z(t) = \varphi_x(t) - \varphi_z^0.$$

Приняв закон изменения компенсирующих полей (1), мы можем построить отклик системы на изменение ΔH_i (здесь и далее $\Delta H_i = H_i - H_0$, $\Delta H_{Mi} = H_{Mi} - H_0$) какой-либо компоненты измеряемого магнитного поля (рис. 3, кривые 1, 2). Временная зависимость сигнала отклика (под сигналом здесь и далее понимается мгновенное значение модуля поля, измеренное датчиком) близка к синусоидальной, и в трех точках $\varphi_i^0 = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ модуль полного магнитного поля воспроизводит

(пока что не абсолютно точно) значения трех компонент измеряемого поля:

$$H(t) = \sqrt{\sum_i (H_i + H_{ACi})^2} \approx \approx H_0 + \frac{1}{3} \sum_i \Delta H_i [1 + 2 \cos \varphi_i(t)]. \quad (2)$$

По результатам измерения этих трех компонент система должна скорректировать значения H_{ACi} так, чтобы $H_{Mi} = H_i$. Результат такой обработки системой обратной связи приведен на рис. 3 (кривая 3). Теперь модуль полного магнитного поля в точках, где производится измерение, в точности воспроизводит значения трех компонент измеряемого поля, а производная модуля полного поля по фазе (а следовательно, и по времени) в этих точках равна нулю:

$$H(t) \approx H_0 + \frac{1}{9} \sum_i \Delta H_i [1 + 2 \cos \varphi_i(t)]^2. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены варианты отклика системы на различные вариации вектора измеряемого поля. Видно, что равенство нулю производной в точках, где производится измерение, сохраняется во всех случаях. Теперь мы можем сформулировать требования к точности выбора этих точек и (при замене точки сегментом на окружности) к ширине сегмента, обеспечивающей точность измерения 0.1 нТл. Наиболее жестки эти требования при максимальной вариации поля $\Delta H_i = 1000$ нТл: $\Delta \varphi = \pm 0.5^\circ$. При этом чувствительность измерения каждой компоненты на сегменте шириной 1° оказывается в $\sqrt{360} \approx 19$ раз меньше чувствительности скалярного датчика. С уменьшением вариации измеряемого поля растет ширина сегмента: $\Delta \varphi = \pm 3^\circ$ при $\Delta H_i = 50$ нТл, $\Delta \varphi = \pm 10^\circ$ при $\Delta H_i = 5$ нТл, $\Delta \varphi = \pm 33^\circ$ при $\Delta H_i = 0.5$ нТл. Таким образом, введение дополнительных систем компенсации вариаций поля позволит расширить временной диапазон полезных измерений на всю окружность.

Кроме того, даже без введения систем компенсации вариаций поля возможна обработка сигнала в реальном времени, также позволяющая расширить временной диапазон полезных измерений на всю окружность. Рассмотрим самый общий случай, когда работает система обратных связей (и, следовательно, $\Delta H_{Mi} \approx \Delta H_i$), но также присутствуют быстрые, еще не отработанные обратными связями флуктуации измеряемого поля Δ_i , так что $\Delta H_i = \Delta H_{Mi} + \Delta_i$. В свою очередь, в ΔH_{Mi} вносят вклад вариации коэффициентов k_i катушек:

$$\Delta H_{Mi} = (H_0 + \Delta H'_{Mi})(1 + \Delta k_i) - H_0 \approx \approx \Delta H'_{Mi} + \Delta k_i H_0. \quad (4)$$

Здесь $\Delta H'_{Mi}$ – собственно результат измерений, $\Delta k_i = k_i - 1$ – отклонения коэффициентов передачи катушек k_i от единицы, учитывающие как изменения геометрического фактора катушек, так и дрейфы источника тока.

Тогда

$$H(t) \approx H_0 + \frac{1}{9} \sum_i \Delta H_{Mi} [1 + 2 \cos \varphi_i(t)]^2 + \frac{1}{3} \sum_i \Delta_i [1 + 2 \cos \varphi_i(t)]. \quad (5)$$

Этот сигнал может быть представлен в виде

$$H(t) \approx H_0 + A + B \cos \omega t + C \sin \omega t + D \cos 2\omega t + E \sin 2\omega t, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{3} \sum_i \Delta H_i, \\ B &= \frac{2}{9} \sum_i (3\Delta H_i - \Delta H_{Mi}) \cos \varphi_i^0, \\ C &= \frac{2}{9} \sum_i (3\Delta H_i - \Delta H_{Mi}) \sin \varphi_i^0, \\ D &= \frac{2}{9} \sum_i \Delta H_{Mi} \cos 2\varphi_i^0, \\ E &= \frac{2}{9} \sum_i \Delta H_{Mi} \sin 2\varphi_i^0. \end{aligned} \quad (7)$$

Параметр A в (6) может быть измерен в реальном времени усреднением сигнала за период модуляции (вращения поля) T_{mod} , параметры B и C могут быть измерены синхронным детектированием на частоте ω , параметры D и E – синхронным детектированием на частоте 2ω :

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{T_{\text{mod}}} \int_0^{T_{\text{mod}}} S(t) dt, \quad B = \frac{2}{T_{\text{mod}}} \int_0^{T_{\text{mod}}} S(t) \cos \omega t dt, \\ C &= \frac{2}{T_{\text{mod}}} \int_0^{T_{\text{mod}}} S(t) \sin \omega t dt, \\ D &= \frac{2}{T_{\text{mod}}} \int_0^{T_{\text{mod}}} S(t) \cos 2\omega t dt, \\ E &= \frac{2}{T_{\text{mod}}} \int_0^{T_{\text{mod}}} S(t) \sin 2\omega t dt. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta H_x &= A + (B + D), \\ \Delta H_y &= A - (B + D)/2 + \sqrt{3}(C - E)/2, \\ \Delta H_z &= A - (B + D)/2 - \sqrt{3}(C - E)/2. \end{aligned} \quad (9)$$

В результате значения ΔH_i будут вычислены с использованием всей информации по периоду с уменьшением отношения сигнал/шум всего в 2 раза (за счет эффективности синхронного детектирования) по сравнению с отношением сигнал/шум модульного датчика. Чувствительность измерения компоненты при этом всего в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем чувствительность измерения модуля, и в $(N/2)^{1/2}$ выше, чем чувствительность при измерении каждой компоненты в одной точке на период модуляции.

Далее, из (4) и (7) следует, что синхронное детектирование сигнала на частоте 2ω позволяет получить независимую информацию о коэффициентах k_i катушек, точнее – об отклонении Δk_i от их среднего (в данный момент времени) значения. Точность такого измерения того же порядка, что и точность измерения компонент поля. Так, в случае использования систем с медленной компенсацией вариаций измеряемого поля

$$\begin{aligned} \Delta k_x - \frac{1}{3} \sum_i \Delta k_i &= \frac{1}{H_0} 3D, \\ \Delta k_y - \frac{1}{3} \sum_i \Delta k_i &= \frac{1}{H_0} \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} E - \frac{3}{2} D \right), \\ \Delta k_z - \frac{1}{3} \sum_i \Delta k_i &= \frac{1}{H_0} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} E - \frac{3}{2} D \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно (10), коэффициенты катушек могут быть выравнены непосредственно в процессе измерения поля. Такая процедура не улучшит точность измерения модуля поля, однако позволит устранить влияние дрейфов катушек на точность измерения направления поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для численного моделирования процесса измерения магнитного поля была написана программа, работоспособность которой была проверена моделированием скалярного M_x -магнитометра с известными параметрами. Ядро программы представляет собой модель M_x -магнитометра, представленного как система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), способная осуществлять поиск магнитного M_x -резонанса и привязку к нему. M_x -резонанс описывается стацио-

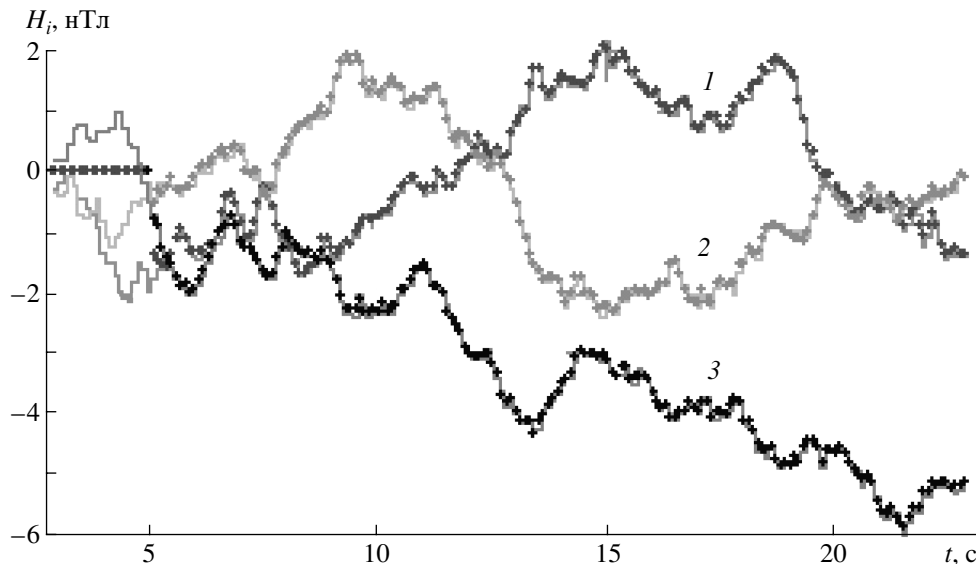


Рис. 5. Численное моделирование процесса захвата ФАПЧ и измерения трех компонент дрейфующего магнитного поля. Сплошные линии – компоненты измеряемого поля, крестики – измеренные значения поля. 1 – H_x , 2 – H_y , 3 – H_z .

нарными решениями уравнений Блоха [1]. В модели учтены дробовые шумы фототока в датчике, а также фазовая задержка сигнала в петле ФАПЧ. Виртуальный M_x -магнитометр помещен в магнитное поле, изменяющееся в соответствии с выражениями (1), (2). Сигнал изменения модуля поля по времени используется как входной сигнал для систем обратной связи. Программа позволяет варьировать параметры магнитного поля (величины компонент, скорость дрейфа, величины скачков), параметры M_x -резонанса (амплитуду, ширину, уширение радиополем, фазовый сдвиг, плотность шума), параметры прибора (частоту оцифровки сигнала, коэффициенты усиления, пороги, задержки и т.д.), дефекты системы колец (вариации коэффициентов, неортогональность осей). Программа моделирует поведение системы (рис. 5) и выводит значения средней ошибки измерений, а также дисперсии измерений и дисперсии ошибки измерений за выбранный интервал времени.

Было исследовано две модели: 1 – с измерением в трех точках на окружности, 2 – с синхронным детектированием сигнала в соответствии с (5)–(8). Обе модели исследовались в стабильном поле в двух вариантах: *A* – без систем компенсации вариаций поля, *B* – с системами компенсации вариаций поля. При этом предполагалось, что для компенсации вариаций поля используются те же катушки, что и для периодической модуляции. Модель с использованием механической сервосистемы отдельно не исследовалась, так как она эквивалентна модели с компенсацией вариаций поля при нулевых отклонениях направления поля \mathbf{H} от своего начального значения. Неортогональность колец

учитывалась введением констант k_{ij} , описывающих вклад поля катушки i на компоненту поля H_j .

Моделировались как системы, использующие калиевый датчик с шириной резонансной линии $\Gamma = 1$ нТл, так и системы, использующие цезиевый датчик с $\Gamma = 20$ нТл, характеризующийся собственной кратковременной чувствительностью $\sigma_{0,1s} = 10$ пТл. Как и следовало ожидать, применение в данной схеме датчика с широкой резонансной линией обеспечило (за счет снижения чувствительности) преимущество как в величине диапазона захвата, так и в скорости слежения за полем. Далее будут приведены результаты именно для этой модели. Вращение поля производилось квазинепрерывно с частотой дискретизации $F_S = 10$ кГц, соответственно период оцифровки сигнала и обработки его схемой ФАПЧ модульного датчика был выбран равным $T_S = 1/F_S = 0.1$ мс, а эффективное время задержки сигнала $T_d = T_S/2$. Гироскопический эффект не учитывался. Первичное осреднение результатов измерений производилось с периодом $T_M = 0.1$ с, с целью уменьшения статистической ошибки в каждой точке проводилось накопление данных по 10^4 отсчетам. Процедура выравнивания коэффициентов катушек k_i , согласно (10), не была включена в алгоритмы основных моделей, но была опробована отдельно.

На рис. 6 приведены результаты исследования зависимостей кратковременной (0.1 с) чувствительности σ_X в компоненте X и ошибки в компонентах $\Delta_{\max} = \max(|\Delta_X|, |\Delta_Y|, |\Delta_Z|)$ от периода модуляции T_{mod} (и соответственно от числа точек на период $N = T_{\text{mod}}/T_S$) при $\Delta H_X = 10$ нТл. Видно, что при $T_{\text{mod}} > 3$ мс ($N > 30$) модель 2В обеспечивает

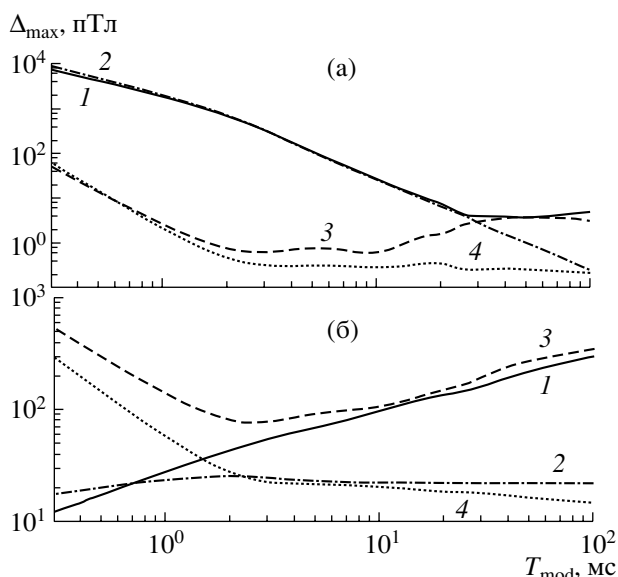


Рис. 6. а – зависимость ошибки в компонентах $\Delta_{\max} = \max(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z)$ от периода модуляции T_{mod} при $\Delta H_X = 10$ нТл, $\Delta H_Y = \Delta H_Z = 0$; б – зависимость кратковременной (0.1с) чувствительности σ_X в компоненте X от периода модуляции T_{mod} . 1 – 1А, 2 – 2А, 3 – 1В, 4 – 2В.

наименьшие ошибки (на уровне шума при осреднении по 10^4 измерений) при наиболее высокой чувствительности, при этом эффективная постоянная времени отклика $\tau \leq 0.1$ с обеспечивается при $T_{\text{mod}} \leq 50$ мс. Параметры модели 2А приближаются к параметрам модели 2В при больших T_{mod} , но модель 2А при этом требует подбора коэффициентов усиления в петлях обратных связей с точностью до 1%, тогда как модель 2В лишена этого недостатка. При малых T_{mod} ошибка не зависит от способа обработки сигнала и определяется величинами отклонения поля и временной задержки сигнала.

Рисунок 6а подтверждает выводы предыдущего раздела о зависимости чувствительности измерения компоненты от числа точек на период модуляции.

Численное моделирование показало, что моделям без систем компенсации вариаций поля (1А, 2А) свойственны ошибки, пропорциональные величине отклонения измеряемого поля: $\Delta_i/\Delta H_i \approx 0.001$. Этого недостатка лишены модели с системами компенсации вариаций поля (1В, 2В), однако в этих моделях в измерение дает непосредственный вклад изменение коэффициента компенсирующей катушки: $\Delta_i/\Delta H_i = \Delta k_i$. В отсутствие вариаций коэффициента компенсирующей катушки наименьшими сдвигами (менее 0.5 пТл, т.е. на уровне разброса при осреднении) характеризуется модель 2В – модель с синхронным детектированием по всему периоду модуляции и с ком-

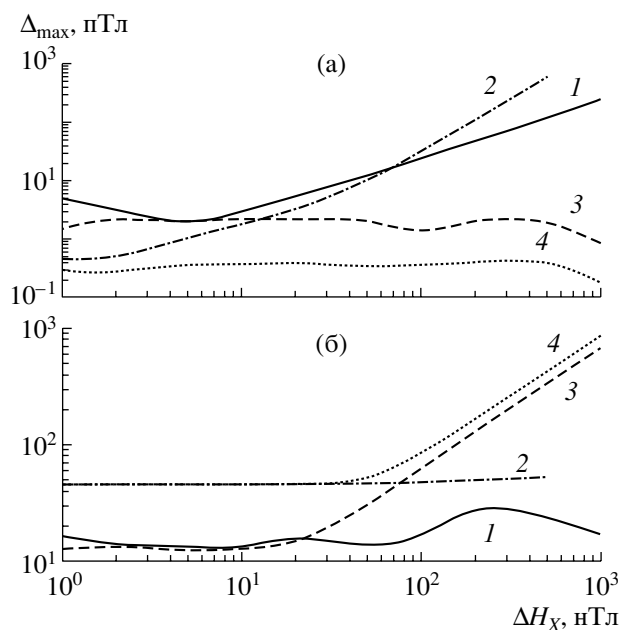


Рис. 7. а – зависимость ошибки в компонентах $\Delta_{\max} = \max(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z)$ от вариации компоненты поля ΔH_X , $\Delta k_i = 0$, б – зависимость прироста ошибки в компонентах от вариации компоненты поля ΔH_X при изменении коэффициента k_X X-колец $\Delta k_X = 0.001$, $\Delta k_Y = \Delta k_Z = 0$. 1 – 1А, 2 – 2А, 3 – 1В, 4 – 2В.

пенсацией вариаций поля. Модель 2В при ширине резонансной линии датчика $\Gamma = 20$ нТл, кратковременной чувствительности датчика $\sigma_{0.1s} = 10$ пТл, периоде модуляции $T_{\text{mod}} = 50$ мс и коэффициенте усиления в петле обратной связи датчика $k_{\text{ФВ}} = 10^4$ продемонстрировала следующие параметры: время отклика (по уровню 0.7) $\tau = 0.1$ с, кратковременная чувствительность за 0.1 с в компонентах поля $\sigma_i = 14.8$ пТл, диапазон начального захвата $|\Delta H_{i0\text{max}}| = 730$ нТл, диапазон отслеживания вариаций поля $|\Delta H_{i\text{max}}| \geq 1000$ нТл, максимальная вариация угла между ортогональными катушками, обеспечивающая абсолютную точность ± 0.1 нТл, $|\Delta \beta| = 0.6''$, максимальные дрейфы системы магнитных колец, обеспечивающие абсолютную точность ± 0.1 нТл: $|\Delta k_{i\text{max}}| = 115 \times 10^{-6}$.

При использовании механической сервосистемы допустимые дрейфы системы магнитных колец могут достигать $\pm 1350 \times 10^{-6}$ (без учета ошибок самой сервосистемы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ одновременного измерения трех компонент вектора земного магнитного поля, характеризующийся высокой абсолютной точностью при малом времени измерения. Проведен аналитический расчет и численное моделирование процесса измерения, основанного на предложенном способе. Показано, что при ис-

пользовании M_x -магнитометра с оптической накачкой и трехкомпонентной симметричной системы магнитных колец возможно одновременное измерение трех компонент вектора земного магнитного поля с абсолютной точностью ± 0.1 нТл при времени измерения 0.1 с.

Автор благодарит Е.Б. Александрова за критику, обсуждения и помощь в работе над статьей и А.С. Пазгалева за плодотворное обсуждение идеи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 448 с.
2. Jung P., Van Cakenbergne J. // Archives des Sciences. Geneve, 1961. V. 14. Fascicule Special. P. 132–137.
3. Alldredge L.R., Saldukas I. The Automatic Standard Magnetic Observatory. Techn. Bull. № 31. U.S. Dep. of Commerce. Washington, D.C.: GPO, 1966.
4. De Vuyst A.P. Magnétomètre Théodolite à Protons. Institut Royal Météorologique de Belgique. 1971. Misc. Ser. C. № 2. 23 p. (Report to the International Association of Geomagnetism and Aeronomy. General Assembly, Moscow).
5. Fairweather A.J., Usher M.J. // J. Phys. E. 1972. V. 5. № 10. P. 986–990.
6. Usher M.J., Reid J.P. // J. Phys. E. 1978. V. 11. № 12. P. 1169–1172.
7. Rasson J.L. // Geophys. Trans. 1991. V. 36. P. 187–94.
8. Gravrand O., Khokhlov A., Le Mouel J.L. et al. // Earth Planets Space. 2001. V. 53. P. 949–958.
9. Alexandrov E.B., Balabas M.V., Kulyasov V.N. et al. // Meas. Sci. Technol. 2004. V. 15. P. 918–922.
10. Alexandrov E.B., Balabas M.V., Pazgalev A.C., Yakobson N.N., Vershovskii A.K. // Laser Physics. 1996. V. 6. № 2. P. 244–251.
11. Merayo J.M.G., Brauer P., Primdahl F., Petersen J.R., Nielsen O.V. // Meas. Sci. Technol. 2000. V. 11. P. 120–132.