

Быстродействующий трехкомпонентный магнитометр-вариометр на основе цезиевого датчика

© А.К. Вершовский,¹ М.В. Балабас,² А.Э. Иванов,² В.Н. Кулясов,² А.С. Пазгалев,¹ Е.Б. Александров¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: antver@mail.ioffe.ru

² Всероссийский научный центр „Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова“,

199034 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: balabas@soi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 30 мая 2005 г.)

Разработан и испытан новый быстродействующий трехкомпонентный магнитометр-вариометр на основе цезиевого датчика, предназначенный для измерения продольной компоненты магнитного поля Земли (МПЗ) в диапазоне 20–65 μT и двух поперечных компонент МПЗ в диапазоне $\pm 1 \mu\text{T}$. Воспроизводимость измерений составляет 0.15 нТ, ограниченная шумами чувствительность — 0.010 нТ [среднее квадратичное отклонение (с.к.о.)] или 0.04' при времени измерения 0.1 с.

PACS: 85.70.Ay

1. Постановка задачи

Векторный магнитометр-вариометр (ВМВ), описанный ниже, предназначен для одновременного измерения вариаций всех трех компонент магнитного поля с быстродействием до десяти измерений в секунду. Прибор представляет собой еще одно воплощение идеи векторного магнитометра, основанного на скалярном датчике, помещенном в переменное магнитное поле [1–8]. Основными отличиями ВМВ от приборов, описанных в [1–8], являются использование датчика с оптической накачкой [9–10] и использование непрерывного быстрого вращения поперечного магнитного поля. На тех же принципах был основан калиевый магнитометр-вариометр, описанный авторами в [11]. Данная работа является еще одним шагом на пути к повышению компактности и увеличению чувствительности прибора. Идея проекта состоит в помещении быстродействующего квантового магнитометра в центр высокостабильной колючей системы, ориентированной в магнитном поле Земли (МПЗ) и создающей в датчике переменное магнитное поле, вектор которого совершает коническое вращение вокруг вектора МПЗ. Колючая система представляет собой сочетание скорректированного соленоида с осью, направленной вдоль вектора МПЗ, с двумя колючими обмотками, создающими взаимно ортогональные поля в плоскости, перпендикулярной МПЗ. Эти две обмотки возбуждаются синусоидальным током с частотой f (несколько десятков или сотен Hz), причем фазы токов двух обмоток сдвинуты на 90° относительно друг друга. Таким образом, эти две ортогональные обмотки создают поле, вектор которого вращается с частотой f в плоскости, перпендикулярной вектору МПЗ. Постоянный ток создает в соленоиде магнитное поле, обеспечивая $\sim 95\%$ -ную компенсацию МПЗ. При совместном включении всех трех токов в центре системы образуется

магнитное поле, вектор которого вращается по конусу с раствором $30\text{--}60^\circ$ относительно вектора МПЗ.

Блок-схема прибора приведена на рис. 1. Датчик магнитометра собран по стандартной схеме. В центр колючей системы помещается сферическая (или цилиндрическая кювета) с парами цезия диаметром 20 мм, покрытая изнутри пленкой парафина. Неоднородность поля, создаваемого колючей системой, на размере ячейки не превышает 1 нТ. Пары атомов цезия при комнатной температуре возбуждаются циркулярно поляризованным лучом света накачки от цезиевой лампы. С помощью интерференционного фильтра в свете накачки выделена резонансная линия D_1 ($\lambda = 8943 \text{ \AA}$). Луч накачки направлен вдоль оси прибора (т.е. под углом $30\text{--}60^\circ$ к вектору магнитного поля), обеспечивая возможность наблюдения M_x -сигнала. Для его возбуждения в катушку радиополя датчика подается высокочастотный ток, сформированный цифровым синтезатором частоты. Частота синтезатора управляется микроконтроллером, который в свою очередь управляется аналоговым сигналом с выхода фазового детектора, использующего фазовую зависимость M_x -сигнала для привязки синтезатора к частоте резонанса. Частота M_x -сигнала определяется величиной модуля вращающегося магнитного поля. Точное значение частоты определяется выбором остаточной компоненты продольного магнитного поля и величиной амплитуды вращающегося поперечного поля. Частота магнитного резонанса постоянна во времени в условиях идеально стабильного внешнего поля и идеально выровненной по полю оси колючей системы.

При изменении поперечных компонент МПЗ ось прецессии суммарного вектора магнитного поля в центре системы отклоняется от вектора МПЗ. Это приводит (как будет показано ниже) к модуляции величины вектора на частоте f . Система цифровой обратной связи слежения за частотой резонанса регистрирует эту моду-

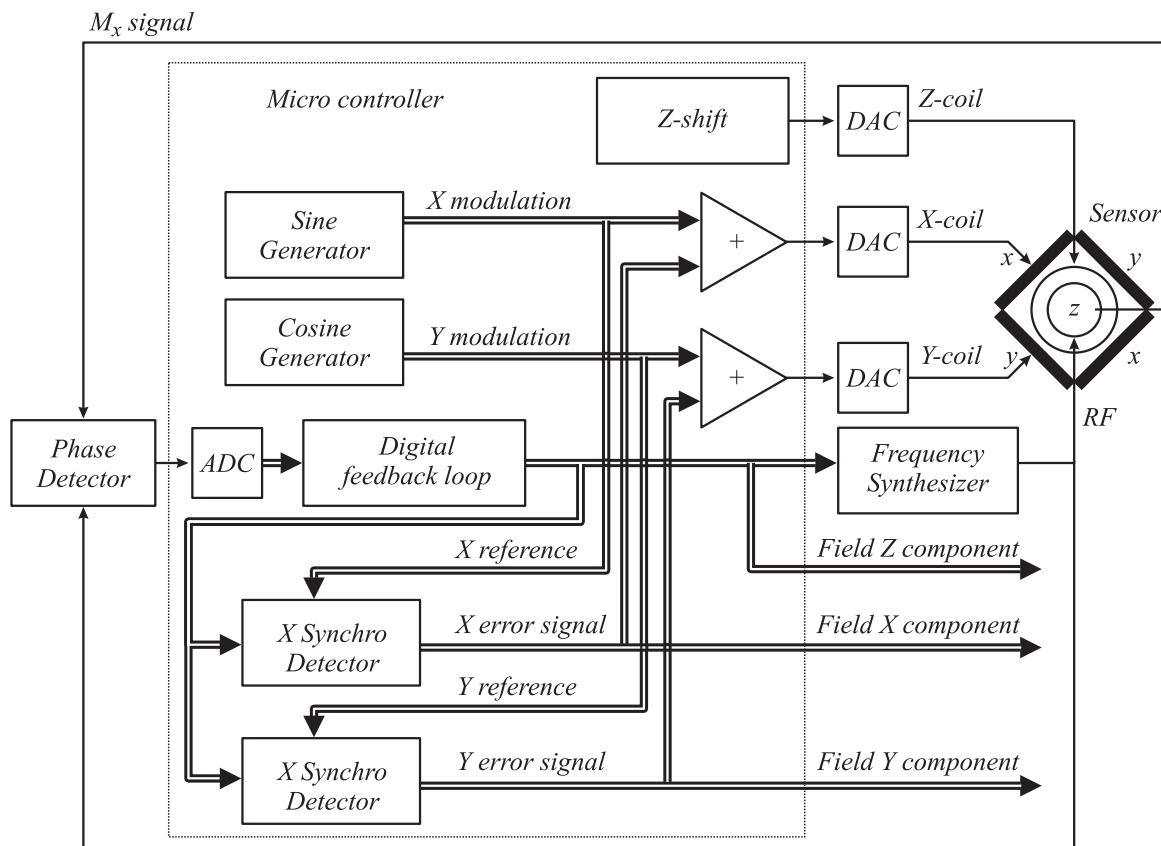


Рис. 1. Блок-схема векторного магнитометра-вариометра.

лянию непосредственно в виде временной зависимости частоты синтезатора. Программно реализованы два синхронных детектора, ортогональных по фазе, работающих на частоте модуляции f . Выходные сигналы синхронных детекторов, пропорциональные величине поперечных компонент МПЗ, используются для создания полей, полностью компенсирующих соответствующие поперечные компоненты МПЗ. Постоянные токи в соответствующих обмотках становятся мерами вариации поперечных компонент МПЗ. Величина продольной составляющей скомпенсированного МПЗ находится из модуля полного вектора и амплитуды вращающейся компоненты, образующих гипотенузу и катет прямоугольного треугольника. Величины поперечных компонент задаются (и измеряются) цифровым кодом, программирующим прецизионные источники токов поперечных обмоток.

Снижение более чем в 10 раз по сравнению с [11] модуля, действующего на прибор постоянного магнитного поля, позволяет резко увеличить угол отклонения вращающегося магнитного поля от оси вращения при той же амплитуде вращающейся компоненты поля, и тем самым повысить разрешающую способность регистрации поперечных составляющих вектора МПЗ. Такая модификация позволяет в несколько раз уменьшить размеры датчика и колечной системы.

Выбор цезия для наполнения кюветы магнитометра определяется наибольшей величиной сверхтонкого рас-

щепления основного состояния атома, обеспечивающей минимальное квадратичное расщепление подуровней магнитных линий. В магнитном поле напряженностью H линия резонанса представляет собой набор эквидистантных линий с расстоянием $26.6 \text{ Hz} \cdot H^2$, где H измеряется в эрстедах. В поле порядка 0.07 Oe расстояние между линиями составляет около 0.13 Hz , что много меньше ширины каждой линии. В результате образуется одна мощная практически симметричная линия магнитного резонанса, что обеспечивает малую величину систематических ошибок измерения продольной компоненты поля.

Измерение поперечных компонент поля не имеет систематических погрешностей, связанных с датчиком. Систематические погрешности могут возникать только в силу нестабильности электронных элементов, а также неточности изготовления колечной системы. Использование в схеме прибора компенсирующего магнитного поля, по модулю сопоставимого с измеряемым полем, предъявляет новые требования к стабильности — и колечная система (соленоид), и используемые для создания компенсирующего и вращающегося магнитных полей источники тока должны обеспечивать стабильность на уровне 0.1 nT . Поэтому каркас колечной системы был выполнен из плавленного кварца; также были специально разработаны управляемые микропроцессором интегрированные в общую электронную схему прибора источники тока с относительной нестабильностью по-

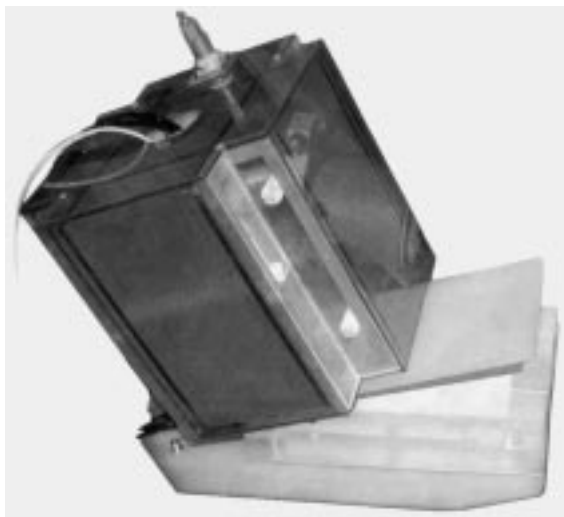


Рис. 2. Внешний вид датчика вариометра.

рядка $5 \cdot 10^{-6}$. Использование в петле обратной связи микропроцессора с 8-разрядными аналоговыми входами и управляемого микропроцессором 32-разрядного синтезатора частоты позволило свести к необходимому минимуму частотные шумы в x – y каналах, и одновременно решить проблему измерения частоты с точностью 10^{-8} за 0.1 s. Использование микропроцессора позволило также сократить предельное время обработки сигнала отклонения магнитного поля до одного периода вращения внешнего поля, избежав при этом возникновения компонент сигнала на частоте второй гармоники модуляции, типичного для аналоговой обработки. Переход на микропроцессорное управление электроникой позволил создать удобный и эргономичный программный интерфейс управления прибором и сбора/обработки данных, работающий в системе MS Windows.

Конструктивно вариометр состоит из блока „датчик–колечная система“ размером $23 \times 23 \times 23$ см, расположенного на кварцевой наклонной подставке (рис. 2), блока лампы и блока электроники, соединенных с датчиком световодами и коаксиальными кабелями, отнесенными на расстояние 2–3 метра. Подставка имеет механические юстировки для точной ориентации оси прибора. Блок электроники соединяется кабелем (до 50 м) с компьютером, выполняющим функцию терминала прибора. Обмен данных с компьютером-терминалом происходит по последовательному кабелю RS-232. Управление прибором осуществляется с компьютера-терминала посредством команд в ASCII-формате.

2. Принципы работы прибора

Векторная диаграмма формирования магнитного поля в центре датчика прибора показана на рис. 3. Изначально ось прибора z ориентирована вдоль МПЗ \mathbf{H}_0 (на рис. 3 отражена ситуация, когда поле \mathbf{H}_0 отклоняется от своего первоначального направления на малый угол α).

Создаваемое соленоидом поле \mathbf{H}_{zc} в значительной мере компенсирует z -компоненту поля \mathbf{H}_0 ; поле \mathbf{H}'_0 является векторной суммой этих полей: $\mathbf{H}'_0 = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{zc}$. Ортогональные катушки создают вращающееся в плоскости x , y с частотой f поле \mathbf{H}_\perp , так, что при $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{z}$ полное поле в центре датчика $H = |\mathbf{H}| = (H_0^2 + H_\perp^2)^{1/2}$ не содержит гармоник на частоте вращения поля. В случае отклонения направления вектора поля от оси z в значении модуля поля $|\mathbf{H}|$ появляется осциллирующая с частотой f компонента, амплитуда которой S и фаза φ определяются соответственно величиной и направлением поперечной компоненты МПЗ $\Delta \mathbf{H}$.

Как видно из рис. 3, в случае ($\Delta H \ll H'_0$) амплитуду сигнала S можно выразить как

$$S = k \Delta H, \quad (1)$$

где

$$k = H_\perp / (H_0'^2 + H_\perp^2)^{1/2} = \sin(\beta) \quad (2)$$

— фактор преобразования изменения поперечной компоненты поля в сигнал на частоте f . Следовательно, k растет с увеличением амплитуды вращающегося поля H_\perp ; однако увеличивать H_\perp бесконечно нельзя, так

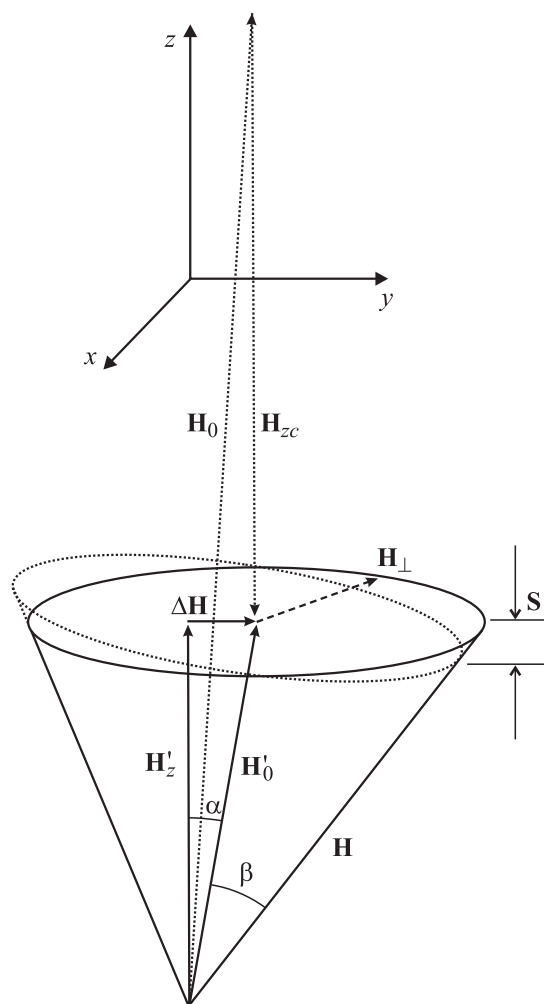


Рис. 3. Векторная диаграмма работы прибора.

как это может существенно уменьшить как стабильность, так и чувствительность измерения z -компоненты поля. Альтернативный способ — уменьшение поля $H'_0 \approx H_0 - H_{zc}$ (поля H_0 и H_{zc} направлены в противоположные стороны). Общая интенсивность поля H в датчике снизу ограничивается диапазоном возможных вариаций МПЗ ($\Delta H \ll H'_0$), а сверху — величиной квадратичного расщепления линии цезия.

Максимальная чувствительность датчика достигается при $\beta = 45^\circ$; однако мы при выборе начального значения β исходили из соображений максимизации чувствительности датчика не в одной точке, а в как можно большем диапазоне вариаций z -компоненты МПЗ.

Окончательно выбираем $H_\perp = 1.5 \div 3$ мкТ и $\beta \approx 40^\circ$. Подставляя значение β в (2), получаем $k = 0.63$. Следовательно, можно ожидать, что на частотах, много меньших f , чувствительность измерения поперечных компонент поля будет в $1/k \approx 1.6$ раза меньше чувствительности измерения модуля поля.

Строго говоря, при расчете чувствительности в поперечных компонентах нужно также принимать во внимание эффективность синхронного детектирования сигнала ошибки на частоте вращения магнитного поля f , в которую в свою очередь вносят вклад флуктуации МПЗ на частоте f . Исследование спектра таких флуктуаций было проведено в [11].

Снижение интенсивностей магнитных полей и переход на цезиевую ячейку позволяют существенно уменьшить объем колючей системы по сравнению с [11]. Расплатой за это является потенциальное снижение долговременной стабильности измерения z -компоненты поля H_z . В схеме, приведенной в [11], погрешность измерения H_z всецело определялась вкладом нестабильности поля в поперечных катушках, уменьшенным в меру малости угла $\beta \approx 5.6^\circ$. В представленной здесь схеме H_z вычисляется, исходя из измеренного значения поля в датчике H и известных величин полей H_{zc} и H_\perp (в отсутствие некомпенсированных поперечных компонент $H_z = H_0$):

$$H_z = H_{zc} + (H^2 - H_\perp^2)^{1/2} \quad (3)$$

и, соответственно, $|dH_z/dH'_{zc}| = 1$, $|dH_z/dH_\perp| = \text{tg}(\beta) = 0.82$. Иными словами, коэффициенты преобразования одинаковых вариаций поля в x , y и z катушках и погрешность измерения z -компоненты поля близки по величине. В то же время в силу того, что абсолютная величина поля в z -катушке H_{zc} в 20 и более раз превышает величины полей в x , y катушках H_\perp , очевидно, что долговременная стабильность прибора полностью определяется стабильностью поля в z -катушке.

Стабильность поля в z -катушке в свою очередь определяется двумя основными параметрами: стабильностью параметров колючей системы и стабильностью питающих колючую систему источников тока. Стабильность параметров колючей системы достигается использованием каркаса из плавленого кварца, имеющего ТКР $6 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$; стабильность источников тока обусловлена

использованием прецизионных источников опорного напряжения, цифро-аналоговых преобразователей (DAC), высокостабильных повторителей и сверхстабильных измерительных резисторов. Общая температурная нестабильность оценивается в $6 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Долговременная стабильность определяется старением прецизионных токоизмерительных резисторов Vishay ($\sim 10^{-4}$). В конечном итоге для решения проблемы стабильности аналоговых электронных компонентов предполагается использовать периодическую автокалибровку прибора на частоте магнитного резонанса в условиях относительно стабильного магнитного поля.

3. Эксперимент

Испытания ВМВ проводились как в магнитном экране, так и в стабилизаторе магнитного поля.

Были исследованы: зависимость амплитуды сигнала, углового диапазона захвата и вариационной чувствительности прибора от угла наклона вращающегося поля к оси датчика (рис. 4); зависимость углового диапазона захвата и вариационной чувствительности прибора от частоты модуляции (рис. 5); частотный отклик прибора; быстродействие прибора — реакция на гармоническое изменение поля с увеличивающейся амплитудой; вариационная чувствительность в компонентах x , y , z (рис. 7); воспроизводимость показаний от включения к включению.

Испытания показали, что при параметрах, оптимальных с точки зрения чувствительности вариационной станции величина поперечных компонент МПЗ, при которых происходит захват сигнала магнитного резонанса, не превышает ± 100 нТ. Это ограничение имеет вполне ясную физическую природу. При наличии вращающегося магнитного поля любое отклонение оси вращения от направления МПЗ приводит к модуляции модуля на частоте вращения (именно на этом основан принцип работы вариометра). В то же время в спектральном

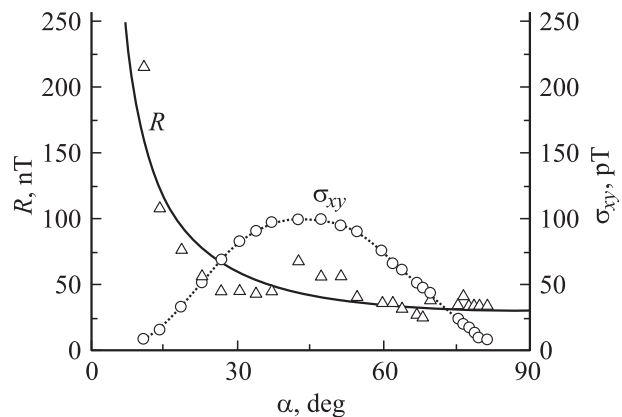


Рис. 4. Зависимость углового диапазона захвата R (Δ) и вариационной x, y чувствительности прибора σ_{xy} (\circ) от угла вращающегося поля к оси датчика α . Непрерывной линией показана теоретическая зависимость σ_{xy} от угла α .

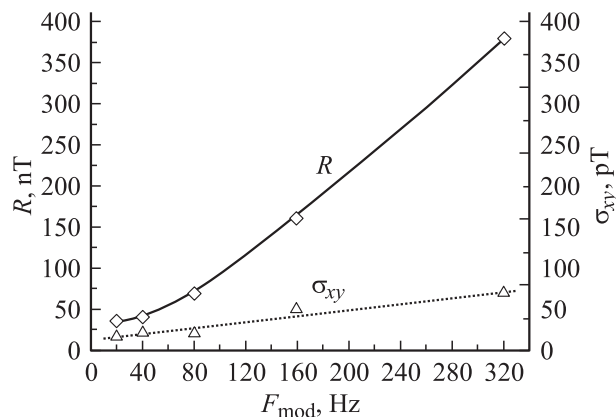


Рис. 5. Зависимость диапазона захвата R (\diamond) и вариационной x - y чувствительности прибора σ_{xy} (Δ) от частоты вращения поперечного поля.

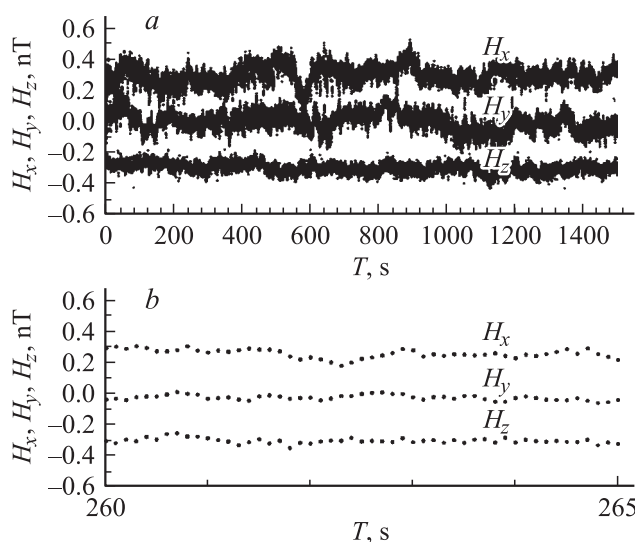


Рис. 6. a — свободный график записей вариаций магнитного поля при активной стабилизации соответствующих компонент МПЗ удаленным датчиком; b — 5-секундный фрагмент той же записи.

представлении такая периодическая модуляция приводит к появлению спектральных компонент сигнала, отстоящих от исходной на целое количество частот модуляции. Амплитуда этих компонент определяется соответствующими функциями Бесселя, и при низких частотах модуляции амплитуды боковых гармоник сравниваются с амплитудой основной гармоники, и захват за нужную гармонику становится практически невозможен. Однако в случае захвата за правильную гармонику включаются системы обратной связи по поперечным компонентам поля, которые сводят угол отклонения оси вращения поля от направления постоянного магнитного поля к нулю и тем самым обеспечивают работу в условиях „чистого“ спектра.

Задача увеличения диапазона начального захвата была решена усложнением алгоритма захвата — при на-

чальном поиске сигнала магнитного резонанса устанавливаются параметры, обеспечивающие максимальный начальный диапазон захвата сигнала магнитного резонанса (частота вращения поперечного поля $f = 640$ Hz, угол отклонения вращающегося поля от оси прибора $\beta = 22^\circ$), и производится захват резонанса; после этого происходит плавное последовательное изменение параметров H_{zc} , f и β . В результате диапазон уверенного захвата прибора был доведен до величины ± 750 nT.

Измерения частотного отклика прибора показали, что эффективная постоянная времени τ в каналах поперечных компонент x, y в зависимости от коэффициента усиления в петле обратной связи варьируется от 0.03 s до 1 s; в дальнейшем параметры системы выбирались такими, чтобы $\tau = (0.1 \div 0.15)$ s. Скорость отслеживания прибором вариаций x - y -компонент магнитного поля составила 780 nT/s.

На рис. 6 и 7 представлены сводный график записей вариаций МПЗ при активной стабилизации всех трех компонент МПЗ (записи сделаны последовательно для каждой компоненты) и соответствующая аллановская диаграмма. На рис. 7 виден спад шумов в x - y каналах на малых временах, обусловленный постоянной времени системы $\tau_{xy} = 0.11$ s. Пунктиром на рис. 7 показаны вариации, „восстановленные“ с учетом τ_{xy} .

Основной вывод — хорошее соответствие вариаций соотношению $\sigma_{xy}/\sigma_z = 1/k$. Действительно, из рис. 7 следует, что $\sigma_{xy}/\sigma_z = (1.8 \pm 0.4)$, тогда как, согласно (2), $1/k = 1.6$. Здесь необходимо отметить, что σ_z в нашем эксперименте определялась не собственной чувствительностью цезиевого датчика, а остаточными нестабильностями магнитного поля в стабилизаторе при стабилизации удаленным на 20 m датчиком; следовательно, измеренные значения $\sigma_{xy} = \sigma_z/k$ были также завышены. Тем не менее можно получить оценку шумов сверху: на рис. 7 коротким пунктиром показаны вариации модуля МПЗ в стабилизаторе, измеренные

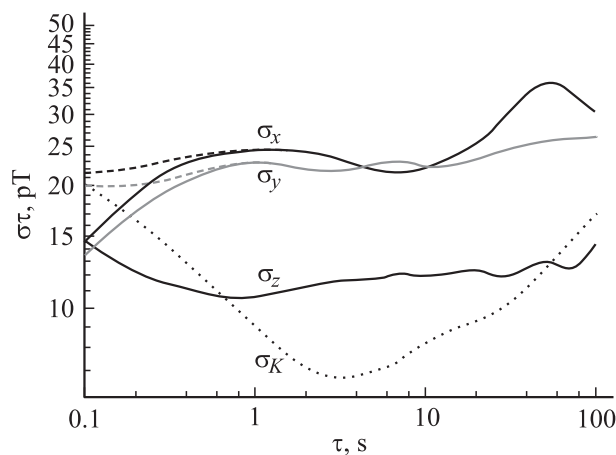


Рис. 7. Сводная аллановская диаграмма вариаций МПЗ при активной стабилизации соответствующих компонент МПЗ. Пунктиром показаны значения σ_x, σ_y с учетом постоянной времени системы $\tau_{xy} = 0.11$ s. Точки (σ_K) — вариация модуля МПЗ, измеренного калиевым M_x -магнитометром.

калиевым модульным магнитометром. Шумы ВМВ при времени измерения 0.1 s практически неразличимы на уровне собственных вариаций магнитного поля в стабилизаторе (0.022 nT с.к.о. на фоне 0.020 nT с.к.о. за 0.1 s). Из этого следует, что собственные шумы ВМВ не превышают 0.010 nT с.к.о. при времени измерения 0.1 s.

Также была измерена воспроизводимость показаний z -канала ВМВ от включения к включению: показано, что расхождение показаний не превышает ± 0.15 nT. Однако следует признать, что долговременная стабильность прибора не была исследована в достаточной мере. В первую очередь это относится к стабильности z -канала. Достижение уровня стабильности 0.1 nT в z -канале прибора требует дополнительных исследований и усилий по снижению влияния причин возможных дрейфов. Все измерения проводились в помещении с активной термостабилизацией температуры воздуха на уровне $T = (22 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Были разработаны и испытаны процедуры автоматической калибровки констант x , y - и z -катушек и их кросс-констант, связанных с неортогональностью осей катушек или с неточностью размещения датчика в колечной системе. Автокалибровка проводится в стабилизированном или спокойном поле и не требует внешнего оборудования. Точность автокалибровки δH определяется чувствительностью прибора σ_z , нестабильностью внешнего магнитного поля ΔH_0 , величиной вариации поля в измеряемой катушке ΔH_i , ($i = x, y, z$), полным рабочим полем в измеряемой катушке H_i и числом повторений процедуры N :

$$\Delta H = (1/k)(1/N)^{1/2} \cdot (\sigma_z^2 + \Delta H_0^2)^{1/2} \cdot (H_i/\Delta H_i), \quad (4)$$

где $H_x/\Delta H_x = H_y/\Delta H_y = 2$, $H_z/\Delta H_z \approx 15$.

Следовательно, для калибровки z -катушки с точностью ~ 0.1 nT в стабилизаторе поля, обеспечивающем $\Delta H_0^2 \leq \sigma_z^2$, достаточно 4–6-кратного повторения процедуры калибровки.

В настоящее время проводится разработка уменьшенной колечной системы ВМВ с кольцами более высокого порядка. Компактизация колечной системы позволит термостатировать весь объем датчика и колечной системы, соответственно снизив на 1–2 порядка дрейфы z -канала прибора.

Заключение

Представленный векторный магнитометр-вариометр может найти применение как абсолютный прибор для геофизических обсерваторий. Сочетание долговременной стабильности с высоким быстродействием, нехарактерное для квантовых прецессионных магнитометров, выгодно выделяет его среди других приборов.

Авторы благодарят В.Я. Шифрина и Е.Н. Чопорову за предоставленную возможность проведения исследования в стабилизированной мере магнитной индукции земного диапазона на магнитной станции ВНИИМ.

Список литературы

- [1] Jung P., Van Cakenbergne J. // Archives des Sciences. Geneve, 1961. Vol. 14. Fascicule Special. P. 132–137.
- [2] Alldredge L.R., Saldukas I. // The Automatic Standard Magnetic Observatory. Technical Bulletin N 31. U.S. Department of Commerce, Environmental Science Services Administration, Coast and Geodetic Survey. Washington. D.C.: GPO, 1966.
- [3] De Vuyst A.P. // Magnéto-mètre Théodolite à Protons. Institut Royal Météorologique de Belgique, Miscellanea–SERIE C, N/г 2.23p. Report to the International Association of Geomagnetism and Aeronomy, General Assembly. Moscow. Russia, 1971.
- [4] Fairweather A.J., Usher M.J. // J. Phys. E. 1972. Vol. 5. N 10. P. 986–990.
- [5] Usher M.J., Reid J.P. // Journal of physics E — Scientific Instr. 1978. Vol. 11. N 12. P. 1169–1172.
- [6] Rasson J.L. // Geophysical Transaction. 1991. 36. P. 187–194.
- [7] Gravrand O., Khokhlov A., Le Mouél J.L. et al. // Earth Planets Space. 2001. 53. P. 949–958.
- [8] Schott J.J., Pérès A., Cantin J.M. // Proceedings Of The Xth IAGA Workshop On Geomagnetic Instruments Data Acquisition And Processing, Hermanus, 2002. P. 147.
- [9] Alexandrov E.B., Balabas M.V., Verhovskii A.K. et al. // Opt. Spectrosc. 1995. Vol. 78. N 2. P. 325–332.
- [10] Alexandrov E.B., Balabas M.V., Verhovskii A.K. et al. // Proceedings MARELEC-97 (Marine Electromagnetic Conf., 23–27 June 1997). London, 1998. P. 8.
- [11] Alexandrov E.B., Balabas M.V., Kulyasov V.N. et al. // Meas. Sci. Technol. 2004. Vol. 15. P. 918–922.