

Оценка уровня собственных шумов датчиков геомагнитного и геоэлектрического полей методом многоканальных измерений

П. Ф. Астафьев, А. Д. Коноплин

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: pashaek@mail.ru, pbs002@mail.ru

Рассмотрено применение методов электромагнитных зондирований для геофизических исследований. Приведены результаты синхронных измерений электрического и магнитного полей Земли, выполненных с помощью датчиков разных типов в частотном диапазоне 0,002–7000 Гц. Описаны различные способы получения оценки шумов датчиков. Предложена методика количественной оценки уровня собственных шумов исследуемых датчиков и характеристик естественного поля на основе двух- и трёхканальной схем синхронных измерений. Экспериментальные оценки шума сравнены с расчётными данными. Показано, что при измерениях естественного переменного магнитного поля нельзя использовать магнитометр на основе магнитомодуляционного преобразователя, имеющий высокий уровень собственного шума.

Ключевые слова: индукционный датчик магнитного поля, магнитомодуляционный датчик магнитного поля, геомагнитное поле, собственные шумы датчика, спектральный анализ временных рядов.

Введение. Информация об уровне собственных шумов измерительных приборов необходима для оценки надёжности получаемых первичных данных, определения условий применения и дальнейшего усовершенствования приборов, а также оптимизации методик полевых работ.

Геофизические исследования методами электромагнитных зондирований основаны на результатах измерений геоэлектрического и геомагнитного полей. При этом используют соответствующие датчики поля. Распространённым типом датчиков геоэлектрического поля является контактный датчик в виде свинцовой пластины. Такой датчик давно применяется, отличается простотой, надёжностью и слабой зависимостью характеристик от условий заземления. Однако шумовые характеристики датчика данного типа ранее не измеряли. Первоначально такой датчик использовали для исследований в низкочастотном (менее 0,1 Гц) диапазоне. В настоящее время верхняя граница частотного диапазона увеличена до 10 кГц, поэтому необходимо оценить уровень шума датчика в высокочастотной области. Для измерения слабого переменного магнитного поля чаще всего служат датчики индукционного типа [1], имеющие относительно простую конструкцию, а также высокие чувствительность и надёжность. Производители таких датчиков чаще всего приводят расчётные характеристики шума, а для выявления неучтённых в расчётной модели особенностей или дефектов конструкции датчика требуется экспериментальная оценка шума.

Перспективным для применения в геоэлектроразведке типом датчика магнитного поля является магнитомодуляционный датчик [2]. Такой датчик имеет небольшие массогабаритные параметры и сохраняет чувствительность при любом уменьшении частоты сигнала (вплоть до постоянного поля). Для датчика данного типа неизвестна расчётная модель шумов, а прямое сравнение с наиболее распространёнными индукционными датчиками ранее не проводилось.

Наиболее простой и очевидный метод оценки уровня шума датчиков магнитного поля – прямое измерение в лабораторных условиях – имеет ряд недостатков [3, 4]. Во-первых, для измерения шума требуется подавление внешнего поля до значения, в несколько раз меньшего уровня шума датчика, что не всегда легко достижимо, особенно при длине датчика 1,0–1,3 м. Во-вторых, в экранированной камере могут присутствовать сторонние воздействия, отсутствующие в реальных условиях работы. Так, в работе [1] приводится пример прямого измерения уровня шума в экранированной камере. Однако приведённые данные показывают наличие существенного паразитного сигнала механического резонанса магнитной колечной системы, значительно искажающего оценку собственного шума прибора. В-третьих, в лабораторных условиях отсутствуют некоторые источники шума, присутствующие в полевых условиях применения, такие как ветровые помехи, микросейсмы и колебания температуры, которые следует учитывать. Кроме того, экранированная камера не относится к легко доступным средствам.

Измерение собственных шумов датчиков электрического поля проще, чем измерение шумов магнитных датчиков. Простейшая модель источника сигнала датчиков электрического поля представляет собой резистивную цепь. Однако такая модель не учитывает шумы электрохимических процессов на гальванических контактах электродов, нестабильность переходной разности потенциалов и контактного сопротивления вследствие колебаний температуры и шумы микросейсм и ветровых помех.

Поэтому наиболее надёжным и точным способом измерения уровня собственных шумов датчиков представляется оценка по результатам синхронного измерения идентичного сигнала в реальных условиях применения аппаратуры. Такие работы проводятся с целью сравнения измерительной аппаратуры и являются одним из методов тестирования при выполнении полевых исследований [1, 5].

Цель настоящей работы – сравнение результатов экспериментальных измерений и теоретического расчёта собственных шумов датчиков поля и определение пригодности датчиков различных типов для применения в геофизических исследованиях, связанных с измерением естественных геоэлектрического и геомагнитного полей.

Аппаратура и методика проведения эксперимента. Эксперимент по измерению уровня собственных шумов датчиков проведён в Артинском районе Свердловской области в 27 км юго-восточнее геофизической обсерватории «Арти» на одном из пунктов магнитотеллурического зондирования. Выбор места обоснован хорошей изученностью, сравнительно низким уровнем техногенных помех и относительно небольшой географической удалённостью. Исследовали компонентные индукционные датчики магнитного поля аппаратуры аудиоманитотеллурического зондирования, магнитомодуляционные датчики магнитного поля и контактные датчики электрического поля, в качестве которых использованы свинцовые пластины размером 200×400×3 мм. Диапазоны плоского (частотно-независимого) интервала амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) индукционного и магнитомодуляционного датчиков составляют 0,25–10000 и 0,01–30 Гц соответственно. Частотную зависимость чувствительности датчиков учитывали при последующей обработке.

В качестве цифрового регистратора использовали измерительный блок аппаратуры электромагнитного зондирования [6]. Регистратор позволяет вести синхронное измерение в диапазоне частот 0–7000 Гц по пяти каналам с частотой дискретизации 15625 Гц и разрядностью

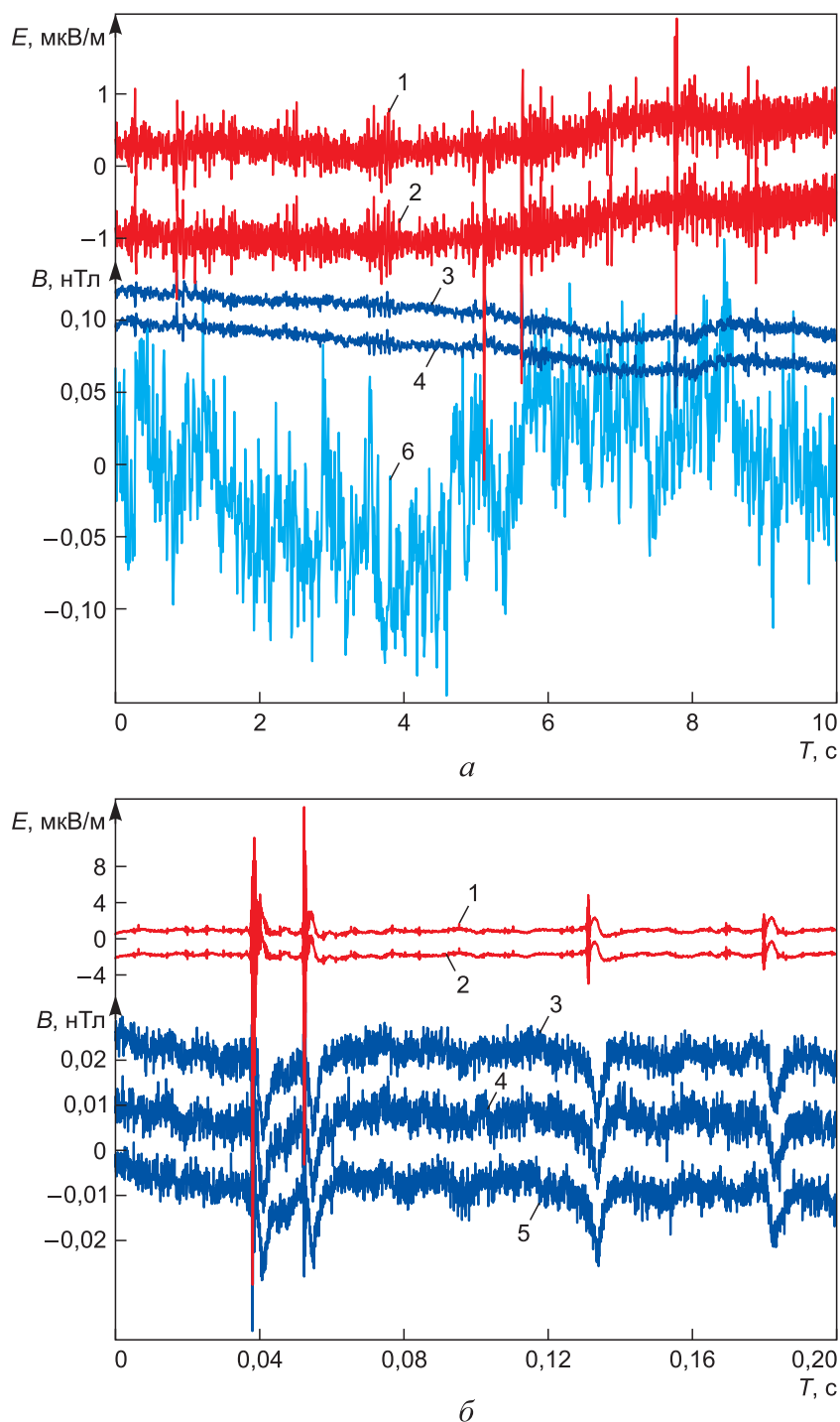


Рис. 1. Фрагменты синхронной регистрации геомагнитного поля с частотами выборки 125 Гц (а) и 15625 Гц (б):

1, 2 – каналы измерения электрического поля; 3–5 – каналы измерения магнитного поля, индукционные датчики; 6 – канал измерения магнитного поля, магнитомодуляционный датчик

Fig. 1. Time series of synchronous records with sample rating 125 Hz (a) and 15625 Hz (b):

1, 2 – electric field channels; 3–5 – magnetic field channels (coil sensors); 6 – magnetic field channel (magnetomodulation sensor)

квантования 24 бит. Измерительный блок также выполняет временную и координатную привязки данных по спутниковой системе навигации. Первичные данные регистрировали на полной частоте выборки 15625 Гц (высокочастотная часть диапазона) и с прореживанием потока в 125 раз, на частоте 125 Гц (низкочастотная часть). Для прореживания применяли цифровой фильтр, реализованный программно. Вся участвовавшая в эксперименте аппаратура изготовлена в лаборатории электрометрии Института геофизики УрО РАН.

Измерения выполняли в трёх временных интервалах для двух индукционных и одного магнитомодуляционного датчика (частота выборки 125 Гц), трёх индукционных датчиков (частота выборки 125 Гц), трёх индукционных датчиков (частота выборки 15625 Гц). Датчики магнитного поля при проведении измерений ориентированы в одном направлении (на магнитный север). Для воспроизведения условий реального применения датчики электрического поля развернуты в виде горизонтальных заземлённых диполей длиной 100 м, ориентированных в одном направлении (с запада на восток). Расстояние между линиями электрических диполей составило 1,5 м. Датчики электрического поля при всех трёх измерениях поля имели одинаковое подключение. Примеры зарегистрированных временных рядов с различными частотами выборки приведены на рис. 1.

Обработка экспериментальных данных. Предварительно перед выполнением основной части обработки и анализа данных отдельные участки регистрации электрического поля, на которых зарегистрирован кратковременный выход за пределы динамического диапазона вследствие экстремально сильных импульсных событий, профильтрованы медианным фильтром с шириной окна 7–19 точек. Суммарная длительность профильтрованных участков составила не более 0,01 % от общей длительности регистрации, поэтому на основной массив данных эта процедура не оказала существенного влияния. Для каналов магнитного поля предварительную фильтрацию не проводили. Цель основной части обработки – получение оценок спектральной плотности мощности (СПМ) полезного сигнала и собственных шумов измерителя в зависимости от частоты методами спектрального анализа полученных временных рядов.

В основе обработки лежит статистическая модель, согласно которой выходной сигнал $s_i(t)$ i -го измерительного канала является суммой двух независимых случайных процессов с нулевым средним: одинакового для всех каналов полезного сигнала $x(t)$ (активности геоэлектрического или геомагнитного поля) и шумов измерителя $n_i(t)$:

$$s_i(t) = x(t) + n_i(t).$$

Шумы в разных каналах независимы:

$$M(n_i n_j) = \begin{cases} \sigma_i^2, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (1)$$

где M – математическое ожидание; σ_i^2 – дисперсия шума.

Для получения статистически состоятельной оценки СПМ сигнала его усредняют по интервалам и соседним частотам [7]. Для этого первоначальную запись разделяют на перекрывающиеся интервалы длиной L отсчётов. Затем на каждом интервале из сигнала вычитают постоянную составляющую и линейный тренд, перемножают с весовой оконной функцией и выполняют дискретное прямое преобразование Фурье. В качестве весовой оконной функции в данном случае использовали функцию Ханна [7], при этом коэффициент перекрытия интервалов составлял 50 %. По полученным в результате этой операции значениям коэффициентов Фурье путём усреднения по интервалам и соседним частотам вычисляют собственные и взаимные СПМ:

$$S_{ij} = \frac{2F}{(M_u - M_l)NLf_s} \sum_{m=M_l}^{M_u} \sum_{n=1}^N S_{nmi} S_{mnj}^*,$$

где S_{ij} – усреднённое значение СПМ; F – коэффициент формы весовой функции; M_l , M_u – номера соответственно нижней и верхней гармоник частотной полосы усреднения; N – количество интервалов разбиения; L – длина интервала и количество точек преобразования Фурье; f_s – частота дискретизации; S_{mni} – комплексное значение гармоники m , интервала n , канала i ; $*$ – оператор комплексного сопряжения.

Диапазон усреднения по частоте выбран таким, чтобы частота нижней гармоники была меньше частоты верхней гармоники не более чем в 1,01 раза. На низких частотах (первых единиц и десятках гармоник) это приводит к усреднению только по интервалам. Усреднённые оценки СПМ являются статистически состоятельными и не зависят от размера исходного массива данных, частоты дискретизации и количества точек преобразования Фурье. В силу независимости полезного сигнала и собственного шума и независимости друг от друга шумов разных измерительных каналов (1) усреднённые оценки СПМ обладают следующим свойством:

$$S_{ij} = \begin{cases} |C_i|^2 (X + N_i), & i = j \\ C_i C_j^* X, & i \neq j, \end{cases}$$

где C_i – комплексный коэффициент передачи измерительного канала; X – СПМ полезного сигнала; N_i – СПМ собственного шума канала.

На этом свойстве основано последующее вычисление значений шумов и полезного сигнала.

Двухканальные измерения. При измерениях идентичного сигнала двумя разными датчиками доступны несколько методов оценки собственного шума. В работе [1] рассмотрен способ оценки собственных шумов по данным параллельного теста как разности сигналов, измеренных двумя датчиками. Теоретически при точно известном АЧХ и фазочастотной характеристике (ФЧХ) датчиков дисперсия разности значений равна сумме дисперсий их собственных шумов. Практически такая оценка чувствительна к неучтённой неидентичности датчиков. Кроме того, этот способ

не позволяет определить долю шумов каждого датчика в общем шуме, и соответственно непригоден для сравнения датчиков разного типа.

В работе [8] предлагается оценивать СПМ шумов одного из двух датчиков по разности его собственной СПМ и СПМ между датчиками:

$$N_i = S_{ii}/|C_i|^2 - S_{ij}/(C_i C_j^*). \quad (2)$$

Такая оценка позволяет определить уровень шума каждого датчика, но она тоже чувствительна к неидентичности ФЧХ и АЧХ измерительных каналов, что может привести к значительному искажению (в среднем – к завышению) результирующей оценки даже при приемлемой неидентичности каналов. От влияния неидентичности ФЧХ можно избавиться, если привести выражение (2) к виду

$$N_i = S_{ii}/|C_i|^2 - |S_{ij}/(C_i C_j^*)|,$$

однако оценка будет по-прежнему чувствительна к неидентичности АЧХ.

Все описанные способы оценки собственного шума по результатам двухканального измерения имеют одну общую ограничивающую особенность: разностный сигнал, по которому определяется шум, коррелирован с измеренным сигналом. В таких условиях наименее чувствительной к неидентичности каналов является оценка, основанная на собственных значениях $\lambda_{+,-}$ ковариационной матрицы измеренных сигналов:

$$\lambda_{+,-} = [(S_{ii} + S_{jj}) \pm \sqrt{(S_{ii} - S_{jj})^2 - 4|S_{ij}|^2}] / 2.$$

При этом СПМ шума и свободную от шумов оценку СПМ полезного сигнала соответственно определяют как

$$N = \lambda_{-} / |C_i C_j^*|;$$

$$X = \frac{\lambda_{+} - \lambda_{-}}{2|C_i C_j^*|} = \frac{\sqrt{(S_{ii} - S_{jj})^2 - 4|S_{ij}|^2}}{2|C_i C_j^*|}.$$

Такая оценка СПМ полезного сигнала мало-чувствительна к неидентичности АЧХ и ФЧХ измерительных каналов, однако она даёт среднее значение шума и соответственно применима только при условии заведомо малой неидентичности шумовых характеристик изучаемых датчиков.

Трёхканальные измерения. При синхронных измерениях тремя различными датчиками для оценки уровня шумов можно

использовать более мощный и универсальный метод оценки – метод «трёх свидетелей». В [9] этот метод применён для оценки погрешности измерения магнитометров, а в [10] – для измерения собственных шумов и динамического диапазона сейсмических датчиков. Метод позволяет однозначно определить соотношение сигнал-шум каждого измерительного канала, при этом необязательно знать чувствительность датчика и обеспечивать однородность группы датчиков. В данном случае метод был модифицирован под обработку комплексных значений взаимных СПМ. Значение СПМ шума и свободную

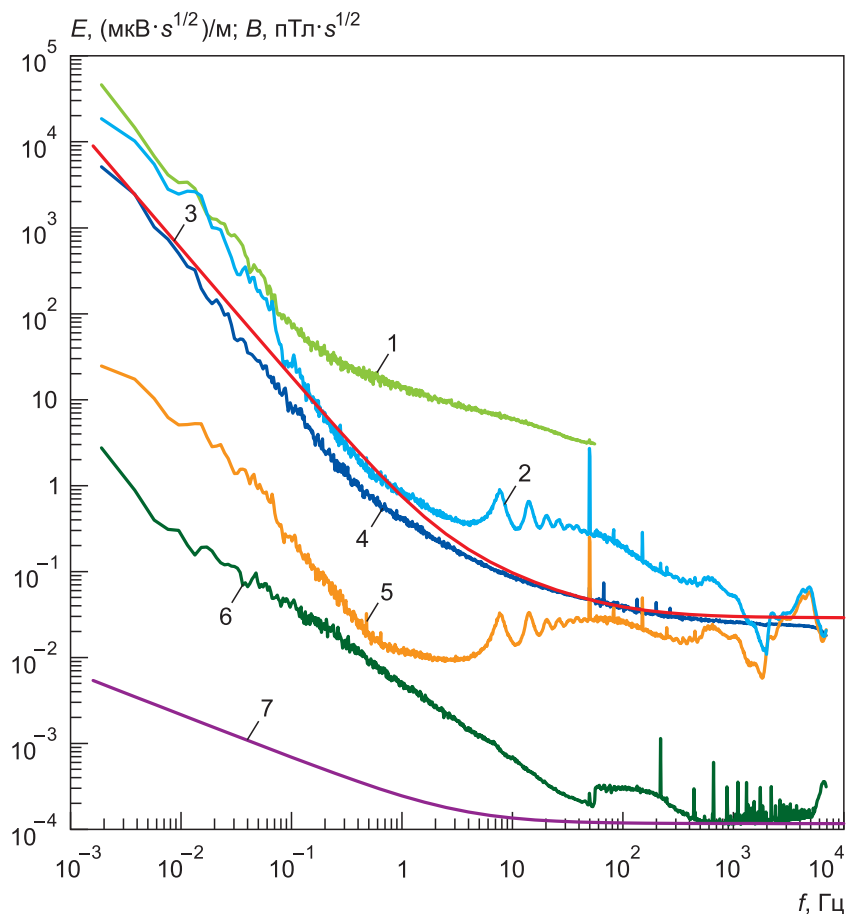


Рис. 2. Результаты обработки экспериментальных данных:

1 – собственный шум магнитомодуляционного датчика; 2 – СПМ геомагнитного поля (свободная от шумов оценка); 3, 4 – соответственно расчётная и экспериментальная оценки собственного шума индукционного датчика; 5 – СПМ геоэлектрического поля (свободная от шумов оценка); 6, 7 – соответственно экспериментальная и расчётная оценки собственного шума датчика электрического поля

Fig. 2. Results of data processing:

1 – self noise of magnetomodulation sensor; 2 – spectral power density (SPD) of geomagnetic field (free of noise); 3, 4 – respectively computational and experimental value of self noise of coil sensor; 5 – SPD of geoelectric field (free of noise); 6, 7 – respectively computational and experimental value of self noise of electric field probes

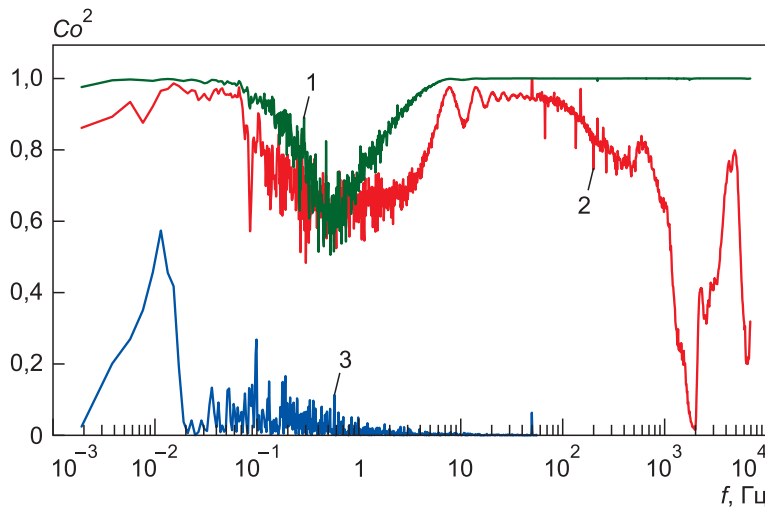


Рис. 3. Когерентность между каналами электрического поля (1) и между каналами магнитного поля с использованием индукционных датчиков (2) и индукционного и магнитомодуляционного датчиков (3)

Fig. 3. Coherency between electric field channels (1), between magnetic field channels with coil sensors (2), between coil sensor and magnetomodulation sensor (3)

от шумов оценку СПМ полезного сигнала соответственно находят по выражениям

$$N_i = |C_i|^{-2} |S_{ii} - S_{ij} S_{ki} / S_{jk}|;$$

$$X_i = |C_i|^{-2} |S_{ij} S_{ki} / S_{jk}|.$$

Дополнительной характеристикой, позволяющей оценить зашумлённость проведённых измерений, является квадрат когерентности:

$$Co_{ij}^2 = |S_{ij}|^2 / (S_{ii} S_{jj}).$$

Эта характеристика показывает степень линейной зависимости двух сигналов в зависимости от частоты.

Методом двухканальных измерений получили оценки собственных шумов датчиков электрического поля и индукционных датчиков, методом «трёх свидетелей» оценили собственные шумы индукционных и магнитомодуляционных датчиков. При этом оценки шумов индукционных датчиков, полученные методами двух- и трёхканальных измерений, практически совпадают, что подтверждает корректность применения метода двухканальных измерений при соответствующих условиях.

Полученные результаты и обсуждение. Основные результаты обработки данных приведены на рис. 2, 3. Полученные результаты в основном подтвердили применимость исследованных датчиков для решения соответствующих задач. Некоторые данные, известные ранее по косвенным признакам, по результатам эксперимента получили прямое

подтверждение. В частности, установлено, что соотношение сигнал–шум при измерении геоэлектрического поля в высокочастотном диапазоне значительно выше этой характеристики для геомагнитного поля.

Датчики геоэлектрического поля. В пределах всего рассмотренного частотного диапазона наибольшее соотношение сигнал–шум, особенно в высокочастотном диапазоне, имеют датчики геоэлектрического поля. Измеренное значение шума в диапазоне 300–5000 Гц практически совпадает с расчётным и близко к теоретически возможному пределу (приведенная ко входу электродвижущая сила шумов составляет 10–12 нВ/Гц^{1/2}). В области низких частот экспериментальные и расчётные оценки шума значительно разнятся, что обусловлено неучтёнными в расчётной модели нестационарными электрохимическими процессами на электроде. Тем не менее даже в этих условиях соотношение сигнал–шум в каналах измерения геоэлектрического поля остаётся достаточно высоким без признаков уменьшения с уменьшением частоты.

Индукционные датчики. Для этих датчиков получены удовлетворительные результаты почти во всём частотном диапазоне, за исключением области энергетического спада геомагнитного поля в диапазоне 1–3 кГц. Расчётные и экспериментальные уровни шума хорошо совпадают по краям диапазона и несколько отличаются в интервале 0,01–1 Гц, что объясняется неполнотой расчётной модели. В области низких частот соотношения сигнал/шум остаётся достаточно высоким для применения датчиков в задачах измерения геомагнитного поля без признаков уменьшения соотношения сигнал/шум с уменьшением частоты. Первоначально указанные датчики разрабатывались для сравнительно короткопериодных измерений (для частот более 0,1 Гц), однако полученный результат показывает, что их применение возможно, как минимум, до периодов 500 с, а скорее всего, до периодов 1500–2500 с.

Магнитомодуляционные датчики. Наихудший результат – наименьшее соотношение сигнал/шум – получено для магнитомодуляционных датчиков. В диапазоне частот 0,1–50 Гц собственный шум магнитомодуляционного датчика больше уровня полезного сигнала геомагнитного поля на 8–26 дБ и уровня шума индукционного датчика на 19–39 дБ. В диапазоне частот 0,01–0,10 Гц за счёт увеличения интенсивности естественного поля соотношение сигнал/шум увеличивается, но не принимает стабильно высоких значений, заметно превышающих единицу. С уменьшением частоты менее 0,01 Гц отношение сигнал–шум снова уменьшается. Дополнительным подтверждением неудовлетворительных шумовых характеристик датчика служит значение когерентности (см. рис. 3). Если для каналов электрического поля и индукционных датчиков эта характеристика в основном имеет высокое значение, то для магнитомодуляционных датчиков когерентность близка к нулю почти во всём частотном диапазоне, кроме нескольких точек в интервале 0,003–0,010 Гц.

Несмотря на потенциально полезные характеристики магнитомодуляционного датчика, его применение при измерениях естественной геомагнитной активности с такими собственными шумами исключено. В настоящее время причины появления такого высокого собственного шума не выяснены, это может быть связано с принципиальными ограничениями метода измерений или особенностями конкретного исполнения. Однако в любом случае для геомагнитных исследований данный датчик непригоден.

Кроме полученных в результате обработки данных о собственных шумах и чувствительности измерительной аппаратуры подтверждены ранее известные особенности естественного геомагнитного поля: уменьшение интенсивности (энергетический спад) поля в диапазонах 0,1–10 Гц и 1–3 кГц и её увеличение на частотах естественного резонатора Земля–ионосфера (7,8; 14; 21; ... Гц, всего прослеживается до семи резонансов вплоть до частоты 50 Гц). Эти данные хорошо согласуются с известными данными по геомагнитному полю [11] и дополнительно подтверждают корректность проведённого эксперимента.

Заключение. Датчики электрического поля пригодны для регистрации естественного электромагнитного поля во всём рассмотренном диапазоне частот. На высоких частотах их шумовая модель достаточно точно описывается источником с чисто активным сопротивлением. Уровень собственного шума индукционных датчиков магнитного поля достаточно низкий для удовлетворительной работы почти во всём частотном диапазоне, за исключением низкочастотного интервала 1–3 кГц. Данные расчётной модели шумов индукционных датчиков хорошо согласуются с экспериментальными, что позволяет принять эту модель в будущих разработках.

Расчётная оценка уровня собственных шумов магнитомодуляционных датчиков практически совпадает с первоначально полученной разработчиком оценкой 5 пТл/Гц^{1/2} на частоте 10 Гц [12]. Однако в настоящее время из-за неприемлемо высокого уровня собственных шумов они не могут заменить индукционные датчики в задачах, связанных с измерением геомагнитного поля.

Список литературы

1. Поляков С. В., Резников Б. И., Щенников А. В., Копытенко Е. А., Самсонов Б. В. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 1. С. 5–27. <https://doi.org/10.3103/S0747923917010078>
2. Сокол-Кутыловский О. Л. Измерение слабого магнитного поля низких частот на фоне геомагнитных вариаций // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 46–49. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-11-46-49>
3. Stutzke N. A., Russek S. E., Pappas D. P., Tondra M., *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 10Q107. <https://doi.org/10.1063/1.1861375>
4. Prance R. J., Clark T. D., Prance H., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 85, no. 1–3, pp. 361–364.

5. Wang C., Bin C., Christman L. E., Glen J. M. G., Klemperer L., McPhee D. K., Kappler K. N., Bleier T. E., Dunson J. C., *Earth, Planets and Space*, 2018, vol. 70, no. 57. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0823-7>
6. Арзамасцев Е. В., Коноплин А. Д., Астафьев П. Ф. Многочастотный комплекс фазочувствительного частотно-индукционного зондирования // Датчики и системы. 2018. № 5. С. 55–60.
7. С. Л. Марпл-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения; Пер. с англ. О. И. Хабарова, Г. А. Сидоровой; Под ред. И. С. Рыжака. М.: Мир, 1990. 584 с.
8. Вагин С. А. Развитие методики регистрации и интерпретации магнитотеллурических данных и результаты зондирования в Восточной части Балтийского щита: дисс. докт. физ.-мат. наук (С. Петербург, 2001).
9. Номерованный О. М., Пьянков В. А. Определение случайной погрешности магнитометров по методу «трёх свидетелей» // В кн.: Теория и аппаратура для геомагнитных исследований. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 67–70.
10. Sleeman R., *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, vol. 96, pp. 258–271. <https://doi.org/10.1785/0120050032>
11. Ando Y., Hayakawa M., *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, 2006, vol. 126, no. 1, pp. 28–30.
12. Сокол-Кутыловский О. Л., Тягунов Д. С. Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4 (13). С. 69–73.

References

1. Poliakov S. V., Reznikov B. I., Shchennikov A. V. et al., *Seism. Instr.*, 2017, vol. 53, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3103/S0747923917010078>
2. Sokol-Kutylovskii O. L., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 60, no. 11, pp. 1137–1141. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1330-8>
3. Stutzke N. A., Russek S. E., Pappas D. P., Tondra M., *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 10Q107. <https://doi.org/10.1063/1.1861375>
4. Prance R. J., Clark T. D., Prance H., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 85, no. 1–3, pp. 361–364.
5. Wang C., Bin C., Christman L. E., Glen J. M. G., Klemperer L., McPhee D. K., Kappler K. N., Bleier T. E., Dunson J. C., *Earth, Planets and Space*, 2018, vol. 70, no. 57. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0823-7>
6. Arzamascev E. V., Konoplin A. D., Astaf'ev P. F., *Datchiki i sistemy*, 2018, no. 5, pp. 55–60 (in Russian).
7. Marple S. L. Jr., *Digital spectral analysis with applications*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1987.
8. S. A. Vagin, Doctoral dissertation of physics and mathematics thesis (St. Petersburg, 2001).
9. Nomerovannyi O. M., P'iankov V. A., *Opredelenie sluchainoi pogreshnocti magnitometrov po metodu "trekh svidetelei"*, in book *Teoria i apparatura dlya geomagnitnykh issledovaniy*, Sverdlovsk, USC AS USSR Publ., 1983, pp. 67–70 (in Russian).

10. Sleeman R., *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, vol. 96, pp. 258–271.
<https://doi.org/10.1785/0120050032>

11. Ando Y., Hayakawa M., *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 2006, vol. 126, no. 1, pp. 28–30.

12. Sokol-Kutylovskiy O. L., Tyagunov D. S., *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, 2007, no. 4 (13), pp. 69–73 (in Russian).

Дата поступления: 03.06.2020.

Дата принятия: 23.06.2020.

Estimation of self noise of geomagnetic and geoelectric field sensors using multichannel measurement method

Pavel F. Astaf'ev, Alexey D. Konoplin

Institute of Geophysics, UB RAS, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: pashaek@mail.ru, pbs002@mail.ru

Results of synchronous electric and magnetic fields measurements made by different types of sensors in the frequency range of 0.002–7000 Hz are covered. Different approaches to obtaining the evaluation of sensor noise are considered. The technique of quantitative estimation of level of natural noise of each sensor and characteristics of a natural field on the basis of two- and three-channel scheme of synchronous measurement is given. Comparison of experimental noise estimations with computational ones is given. It is shown that the magnetometer based on magnetomodulation transducer has an unacceptably high level of its self noise for using it in applications related to the measurement of natural geomagnetic field.

Key words: coil magnetic sensor, magnetomodulation magnetic sensor, geomagnetic field, self noise of sensor, spectral analysis of time series.