

О.Л. СОКОЛ-КУТЫЛОВСКИЙ, Д.С. ТЯГУНОВ

Регистрация вариаций геомагнитного поля магнитомодуляционным датчиком

Показана возможность применения магнитомодуляционных датчиков слабого магнитного поля с аморфным ферромагнитным сердечником, работающих в режиме автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции, для измерения амплитуды и фазы вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0,01–30 Гц. Разрешающая способность магнитомодуляционных датчиков с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции в аморфном ферромагнитном сердечнике с компенсированной продольной магнитострикцией не превышает 1 пТл. Приведены примеры синхронной записи амплитуды трех составляющих вариаций геомагнитного поля на различных участках диапазона измеряемых частот, записанные во время слабой магнитной бури интенсивностью 5 баллов. Получаемая с помощью магнитомодуляционного датчика информация об амплитуде и фазе геомагнитных вариаций совместно с данными по амплитуде электрического поля электромагнитных волн может быть применена в геофизике в различных методах магнитотеллурического зондирования.

Ключевые слова: вариации геомагнитного поля, магнитомодуляционный датчик.

Registration of geomagnetic field variations with a magnetic modulating sensor. O.L. SOKOL-KUTYLOVSKII, D.S. TYAGUNOV (Institute of Geophysics, UrB RAS, Yekaterinburg).

The possibility of using magnetic modulating sensors of the weak magnetic field with amorphous ferromagnetic core operating in the mode of autoparametric signal gain of magnetic induction to measure the amplitude and phase variations of the geomagnetic field in the frequency range 0.01–30 Hz. Resolution of magnetomodulation sensors with autoparametric signal increase of magnetic induction in ferromagnetic amorphous core with offset longitudinal magnetostriction is not more than 1 pTl. Examples of synchronous recording of the amplitude of the three components of the variations of the geomagnetic field in different parts of the measured frequency range, recorded during a weak magnetic storm intensity of five points are given. Information obtained by magnetomodulation sensor about the amplitude and phase of geomagnetic variations, together with data on the amplitude of the electric field of electromagnetic waves can be applied in geophysics to the different methods of magnetotelluric sounding.

Key words: geomagnetic field variations, magnetic modulating sensor.

Введение

В настоящее время для регистрации геомагнитных вариаций в аппаратуре магнитотеллурического зондирования (МТЗ) применяются, как правило, индукционные датчики магнитного поля [5], которые имеют ряд неудобств в эксплуатации. Во-первых, индукционные датчики измеряют не саму составляющую магнитной индукции, а ее изменение ($\partial B/\partial t$), из которой восстановить амплитуду магнитной индукции в широком диапазоне частот достаточно проблематично. Во-вторых, индукционные датчики имеют нелинейную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). В-третьих, они имеют достаточно большие продольные размеры и очень чувствительны к механической вибрации и ветровым помехам, в результате чего перед измерениями их приходится прикапывать в землю, что особенно трудоемко для датчика вертикальной составляющей магнитной индукции.

*СОКОЛ-КУТЫЛОВСКИЙ Олег Леонидович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ТЯГУНОВ Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник (Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург). *E-mail: tds-07@mail.ru

По основным техническим параметрам наиболее подходят для МТЗ датчики на основе эффекта Джозефсона – сверхпроводящие квантовые интерференционные детекторы (СКВИДы), имеющие малые размеры, низкий порог чувствительности и плоскую АЧХ [2, 8–11]. Однако вследствие их работы при температуре жидкого гелия (низкотемпературные СКВИДы) или жидкого азота (высокотемпературные СКВИДы) их применение в полевых условиях нецелесообразно.

Феррозондовые приборы и магнитомодуляционные датчики магнитной индукции относительно просты в изготовлении и имеют малые размеры, но их собственный шум не позволяет получить низкий порог чувствительности в диапазоне низких частот [1], поэтому в аппаратуре МТЗ они практически не применяются.

В последнее время появились сообщения о феррозондах второй гармоники, имеющих на два порядка меньший магнитный шум по сравнению с классическими феррозондовыми магнетометрами. Снижение уровня собственных магнитных шумов в феррозондах второй гармоники удалось получить на основе процесса циркулярного вращения намагниченности в плоскости магнитной пленки феррита-граната [3]. При этом феррит-гранатовая пленка должна всегда находиться в состоянии магнитного насыщения, создаваемого вращающимся магнитным полем с амплитудой ~ 2 мТл в плоскости пленки. Из шумовой характеристики тонкопленочного магнитометра следует, что на частотах от 1 до 100 Гц шум датчика составляет $\sim 0,1$ пТл/Гц^{1/2}, что уже достаточно для возможного применения в методах МТЗ.

Известны также магнитомодуляционные датчики с аморфным ферромагнитным сердечником, работающие в режиме автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции [6], которые могут иметь еще более низкий порог чувствительности. Так как автопараметрический резонанс в таких датчиках наблюдается вблизи области технического насыщения аморфного ферромагнитного сердечника, то его собственный магнитный шум пренебрежимо мал, а за счет резонансного усиления сигнала магнитной индукции коэффициент преобразования датчика вполне достаточен для измерения слабых сигналов переменного магнитного поля.

Технические параметры преобразователя магнитного поля с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции

Количество каналов измерения – 3.

Коэффициент преобразования (чувствительность) – 200 мВ/нТл.

Диапазон частот измеряемого сигнала магнитной индукции – 0,01–30 Гц.

Плоская АЧХ в диапазоне частот 0,01–30 Гц.

Данные измерений компонент магнитного поля, снимаемые с выходов магнитомодуляционных датчиков, поступают на многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) AD7734, оцифровываются и записываются на компьютер.

Напряжение питания – 12 В. Потребляемая мощность (без учета внутренней батареи питания компьютера) – 1,5 Вт.

Регистрация геомагнитных вариаций

Измерения проводились в Алапаевском районе Свердловской области вдали от явных локальных источников техногенного происхождения. Начало регистрации сигналов геомагнитного поля 31.08.2019 г. с 18:20 по местному времени, окончание – 01.09.2019 г. в 10:20. По данным геомагнитной активности, публикуемым Институтом Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН), а также Гидрометцентром г. Екатеринбург Свердловской области, в указанное время наблюдалась слабая магнитная буря интенсивностью 5 баллов.

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений проводилась с помощью программируемого цифрового настраиваемого фильтра на основе дискретного преобразования Фурье.

После записи амплитуды магнитного поля на компьютер для каждой компоненты магнитного поля строился спектр Фурье массива полученных данных. Затем выделялись участки спектра, в которых амплитуда магнитного поля заметно превышала уровень сплошного геомагнитного шума. После этого с помощью цифрового фильтра для всех трех компонент магнитного поля строилась запись амплитуды магнитной индукции на выделенных частотах и выбирались участки этой записи с явным превышением средней амплитуды магнитного поля, представляющие собой волновой пакет, или цуг, колебаний одной частоты. На рис. 1 показан цуг колебаний частоты 0,016 Гц общей продолжительностью 1100 с. Для определения амплитуды берется центральный фрагмент цуга с максимальной амплитудой, состоящий из нескольких полных периодов колебаний.

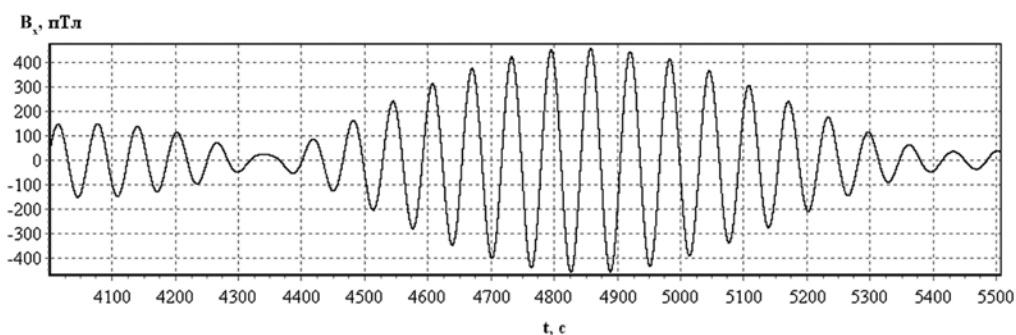


Рис. 1. Цуг колебаний горизонтальной составляющей B_x геомагнитного поля частоты 0,016 Гц. Начало цуга – 4350 с, окончание – 5450 с

Исходя из отношения амплитуд составляющих магнитной индукции, записанных синхронно для вертикальной и горизонтальных составляющих геомагнитного поля, производился отбор тех вариаций, в которых амплитуда горизонтальных составляющих больше или равна амплитуде вертикальной составляющей магнитного поля. Вариации магнитного поля, в которых вертикальная составляющая превышала горизонтальные составляющие геомагнитного поля, отбрасывались, так как высока вероятность того, что они могли быть вызваны шумами техногенного происхождения [4, 7].

Для получения полной информации об амплитуде и фазе геомагнитных вариаций синхронные участки записи амплитуды магнитной индукции совмещались на одном графике, как это представлено на рис. 2 и 3. На каждом графике присутствует полная первичная информация, позволяющая получить отношения амплитуд магнитной индукции в геомагнитных вариациях на выбранной частоте. Используя шкалу времени, можно также получить фазовые соотношения между компонентами вариаций геомагнитного поля заданной частоты.

Обсуждение результатов

Выполненная 16-часовая запись вариаций геомагнитного поля по времени включает слабую магнитную бурю амплитудой до 5 баллов. Кроме показанных на рис. 2 и 3 фрагментов вариаций на записи имеются и другие вариации геомагнитного поля. Так, на частоте 0,016 Гц зафиксирован цуг колебаний геомагнитного поля продолжительностью ~ 1100 с и с достаточно высокой амплитудой: ± 450 пТл по компоненте

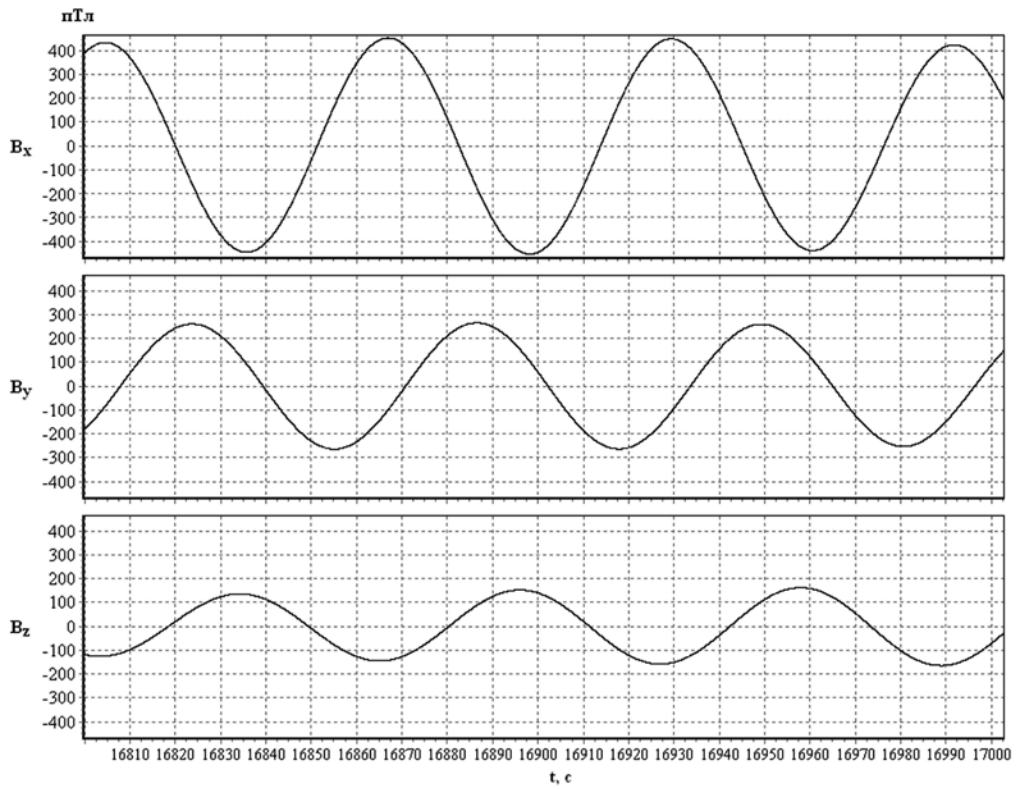


Рис. 2. Фрагменты записи трех компонент цуга колебаний геомагнитного поля со средней частотой 0,016 Гц. Общая продолжительность данного цуга колебаний – 950 с

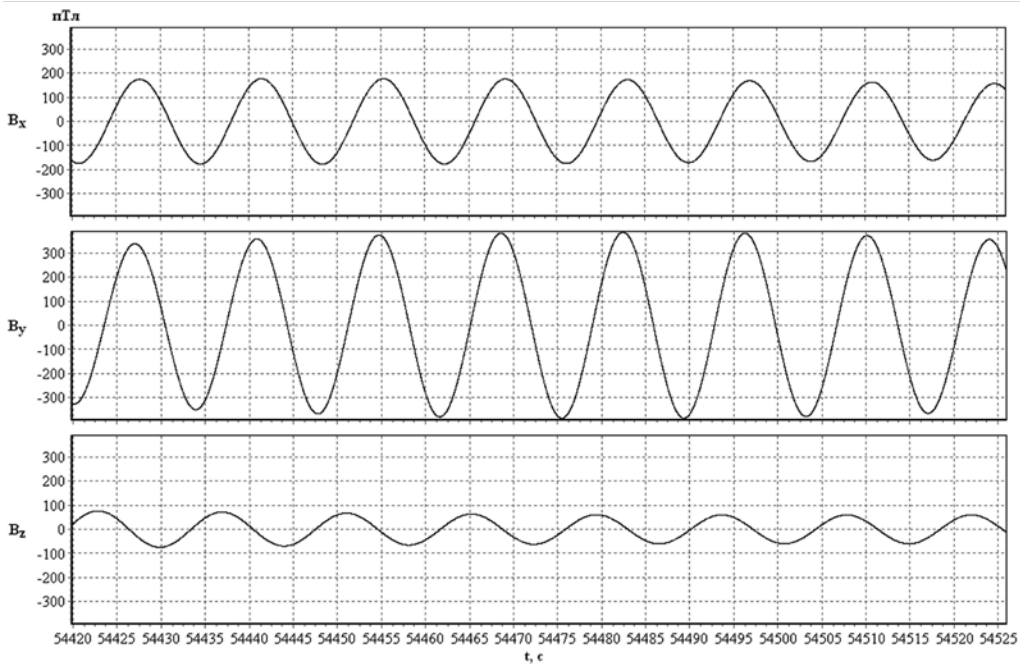


Рис. 3. Фрагмент записи трех компонент вариации геомагнитного поля с частотой $0,0725 \pm 0,0025$ Гц. Полная длина цуга колебаний геомагнитного поля – 350 с

B_x , ± 370 пТл по компоненте B_y и ± 180 пТл по компоненте B_z . На частоте 0,08 Гц также имеется вариация магнитного поля амплитудой до 140 пТл (от пика до пика) продолжительностью до 650 с.

На частотах выше 0,1 Гц значительных вариаций геомагнитного поля не выявлено при среднем шумовом фоне всей записи ± 200 пТл в полной полосе пропускания прибора. Возможно, это связано с достаточно высоким уровнем как геомагнитного шума, так и техногенных помех, амплитуды которых оказались сопоставимыми на этих частотах.

Амплитудно-фазовые соотношения между компонентами вариаций геомагнитного поля

В вариациях магнитного поля, показанных на рис. 2, горизонтальная компонента, направленная по магнитному меридиану, по амплитуде больше горизонтальной компоненты B_y , а на рис. 3, наоборот, компонента B_y значительно больше горизонтальной компоненты B_x .

Как следует из рис. 2 и 3, между различными компонентами вариаций геомагнитного поля имеются значительные фазовые сдвиги. Пик амплитуды компоненты B_x вариации магнитного поля частотой 0,016 Гц отстает от пика амплитуды компоненты B_y на 20 с, что соответствует фазовому сдвигу 115° . Пик амплитуды компоненты B_z этой же частоты опережает пик амплитуды компоненты B_y на 8 с, т.е. фазовый сдвиг равен 46° (рис. 2). Пик амплитуды компоненты B_x в вариации магнитного поля частотой 0,0725 Гц отстает от пика амплитуды компоненты B_y на 2,5 с, то есть фазовый сдвиг равен 65° , а пик амплитуды компоненты B_z отстает от пика амплитуды компоненты B_y на 3 с, что соответствует фазовому сдвигу 78° (рис. 3). При этом максимальный аппаратурный сдвиг фаз между компонентами, обусловленный последовательным считыванием сигналов в каналах измерения и определяемый временем дискретизации при аналого-цифровом преобразовании, не превышает 25 мс.

Заключение

В результате регистрации слабой геомагнитной бури интенсивностью 5 баллов при помощи трехкомпонентного магнитомодуляционного преобразователя была получена полная информация об амплитуде и фазе нескольких цугов вариаций геомагнитного поля. Полученная информация, при дополнении ее данными по электрическим составляющим электромагнитного поля, может быть использована в различных методах МТЗ. Измерения геомагнитных вариаций показали, что магнитомодуляционный датчик надежно регистрирует переменное магнитное поле низких частот с разрешением ~ 1 пТл и менее и может эффективно применяться в геофизических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 188 с.
2. Бурмистров Е.В. Градиентометр на базе ВТСП СКВИДов для работы в неэкранированном пространстве: дис. ... канд. физ.-мат. наук / МГУ им. М.В. Ломоносова. М., 2009. 107 с.
3. Ветошко П.М., Гусев Н.А., Чепурнова Д.А., Самойлова Е.В., Сыворотка И.И., Сыворотка И.М., Звездин А.К., Коротаева А.А., Белотелов В.И. Магнитомодуляционный сенсор магнитного поля на базе пленок феррита-граната для магнитокардиографических исследований // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, вып. 16. С. 64–71.
4. Колесник А.Г., Колесник С.А., Бородин А.С., Шошин Е.Л., Федичев М.А. Электромагнитный фон городских территорий диапазона промышленных частот // Вестн. ТГУ. 2007. № 297. С. 161–164.
5. Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсм. приборы. 2016. Т. 52, № 1. С. 5–27.

6. Сокол-Кутыловский О.Л. Магнитомодуляционные датчики на основе аморфных ферромагнитных сплавов // Измер. техника. 2016. № 2. С. 46–49.
7. Тягунов Д.С., Сокол-Кутыловский О.Л. Спектральное распределение городского магнитного шума в диапазоне низких частот // Вестн. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2016. № 3 (31). С. 58–64.
8. Фалей М.И., Масленников Ю.В., Кошелец В.П. Измерительные системы на ВТСП СКВИДах // Радиотехника. 2012. № 12. С. 5–26.
9. Bick M., Panaitov G., Wolters N., Zhang Y., Bousack H., Braginski A.I., Kalberkamp U., Burkhardt H., Matzande U. A HTS rf SQUID vector magnetometer for geophysical exploration // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 1999. Vol. 9, N 2. P. 3780–3785.
10. Lei Guo, Cai Wang, Saotao Zhi, Zhu Feng, Chong Lei, Yong Zhou. Wide linearity range and highly sensitive MEMS-Based micro-fluxgate sensor with double-layer magnetic core made of Fe-Co-B amorphous alloy // Micromachines. 2017. Vol. 8, N 12. 352.
11. Sasada I. Low-noise fundamental-mode orthogonal fluxgate (FM-OFG) magnetometer built with an amorphous ribbon core // IEEE Trans. Magn. 2018. Vol. 25, N 10. P. 99.