

П. А. Соколов^{1✉}, А. К. Маништейн¹

Промежуточные результаты разработки электромагнитного малоглубинного аппаратурно-программного комплекса с цифровым способом компенсации прямого поля

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: sokolovpa@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Работа посвящена развитию геофизической многочастотной аппаратуры электромагнитного профилирования. Можно констатировать тот факт, что адаптивные устройства – это неотъемлемые элементы современного оборудования, они находят применение для предсказания, идентификации (моделирования), выравнивания (компенсации) характеристик и подавления помех. Исследование направлено на улучшение характеристик измерительного тракта аппаратуры электромагнитного профилирования за счет применения запатентованного способа цифровой фильтрации для подавления помех в процессе работы прибора. В данной работе представлены промежуточные результаты разработки малоглубинного аппаратурно-программного комплекса, разработанный прототип на базе существующей аппаратуры и результаты эксперимента.

Ключевые слова: геофизическое обеспечение поиска полезных ископаемых, наземные индукционные приборы, метод выделения полезного сигнала, цифровая обработка

P. A. Sokolov^{1✉}, A. K. Manstein¹

Interim results of the development of an electromagnetic small-depth hardware and software complex with a digital direct field compensation method

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: sokolovpa@ipgg.sbras.ru

Abstract. The work is devoted to the development of geophysical multi-frequency electromagnetic profiling equipment. It can be stated that adaptive devices are integral elements of modern equipment, they are used for prediction, identification (modeling), equalization (compensation) of characteristics and interference suppression. The research is aimed at improving the characteristics of the measuring path of electromagnetic profiling equipment through the use of a patented digital filtering method to suppress interference during operation of the device. This paper presents the intermediate results of the development of a small-depth hardware and software complex, a prototype developed based on existing equipment, and experimental results.

Keywords: geophysical support for mineral prospecting, surface induction instruments, useful signal selecting method, digital processing

Введение

Геофизические приборы, использующие метод электромагнитного индукционного профилирования, позволяют выявлять локальные различия в удельном

сопротивлении горных пород за счет создания электромагнитного поля с помощью генераторной катушки и последующего измерения сигналов, возникающих от индуцированных токов в земле [1]. Выделение полезного сигнала затрудняется тем, что сигнал от поля генератора (прямое поле) в приемной катушке превосходит по величине полезный сигнал от индуцированных токов, что делает его практически неразличимым на фоне помех.

Разные схемы подавления сигнала от прямого поля имеют различные конструкции, настройки и калибровки, что требует применения сложных электротехнических и конструкторских решений. Анализ существующих методов компенсации сигнала от поля генератора в приемном тракте выявил ряд недостатков в работе оборудования для электромагнитного профилирования. Например, при настройке трехкатушечного зонда [2] использование замкнутого проволочного кольца требует подбора моментов катушек и расстояний, что может усложнить процесс и снизить точность измерений. Кроме того, при идеальной фазировке реальной компоненты полезного сигнала, разностный сигнал многочастотного прибора с тремя катушками над грунтом оказывается в 1.7 раза меньше теоретической реальной компоненты полезного сигнала двухкатушечного зонда [3]. Устройство, описанное в патенте RU2502092 [4], демонстрирует низкую устойчивость к механическим воздействиям, что может привести к изменению настройки и уровня подавления прямого поля во время транспортировки и эксплуатации [Фадеев и др., 2018]. В методе [5] многократное цифро-аналоговое преобразование может вызывать «смещение нуля», а в установившемся режиме значения весовых коэффициентов могут находиться близко к истинному минимуму [6], что негативно влияет на точность выделения полезного сигнала.

Исследование направлено на улучшение характеристик измерительного тракта аппаратуры электромагнитного профилирования за счет применения запатентованного способа фильтрации для подавления помех в процессе работы прибора. Совокупность работ по созданию программного обеспечения, проведению экспериментов, проверке работы алгоритма на реальных и лабораторных данных определяют сложность направления научного исследования.

Целевая функция алгоритма фильтрации

Работа является промежуточным этапом разработки двухкатушечной аппаратуры с цифровым способом компенсации сигнала прямого поля и посвящена развитию геофизической многочастотной аппаратуры электромагнитного профилирования. Для реализации цифрового способа подавления сигнала прямого поля, основными компонентами устройства по меньшей мере являются: генераторная катушка, генератор гармонических сигналов, датчик тока (небольшая катушка в центре генератора), а также одна приемная катушка. Сигналы от катушек преобразуются в цифровой вид с помощью АЦП (аналогово-цифровой преобразователь), после чего оцифрованные данные поступают в блок фильтрации (блок подавления прямого поля), где к зарегистрированным данным применяется многоканальный адаптивный алгоритм RLS и выполняется уточнение параметров целевой функции - в соответствии с методом Нелдера - Мида [7].

В разработанном алгоритме целевая функция включает математическую модель сигнала, содержащую неизвестные весовые коэффициенты. Изменяя эти коэффициенты, невязка между измеренным сигналом и теоретической моделью стремится к наименьшему значению, что является известным методом решения обратных задач [8]. В процессе обработки используются стационарные сигналы, и согласно [6], наиболее подходящей целевой функцией являются наименьшие квадраты ошибок:

$$E = \sum_i (U_{\text{наблюдаемое}_i} - U_{\text{теоретическое}_i})^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $U_{\text{наблюдаемое}}$ – сигнал с приемной катушки, $U_{\text{теоретическое}}$ – математическая модель сигнала с приемной катушки.

Полагая, что электромагнитное поле генератора возбуждается гармоническим током и учитывая, что полезный сигнал, возникающий от индуцированных токов в среде за пределами генераторной петли, отстает на $\pi/2 + \varphi$ (фаза) от первичного поля, и имеет свою амплитуду [9], математическая модель сигнала в приемной катушке представлена в виде:

$$U(t) = A_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) - C_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t), \quad (2)$$

где:

$$\begin{cases} A_1 = A - C \cdot \sin(\varphi) \\ C_1 = C \cdot \cos(\varphi), \end{cases} \quad (3)$$

где A – амплитуда сигнала прямого поля в приемной катушке, В; f – частота, Гц; t – время, сек; C – амплитуда полезного сигнала, В; φ – фаза полезного сигнала, град.

Если генераторная петля находится на достаточном расстоянии от центра приемной катушки, превышающем три диаметра генератора [10], то ее можно рассматривать как диполь. В этом случае амплитуда сигнала прямого поля в приемной катушке будет равна:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_g \cdot N_g \cdot I_0 \cdot S_p \cdot N_p}{4 \cdot \pi \cdot L^3}, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; S_g – площадь генераторной петли, м²; N_g – количество витков в генераторной петле; I_0 – амплитуда тока, протекающего в цепи генератора, А; S_p – площадь генераторной петли; N_p – количество витков в генераторной петле; L – расстояние от центра генераторной петли до центра приемной катушки.

Датчик тока выполнен в виде небольшой катушки и расположен в центре генератора, зная амплитуду сигнала от такого датчика, можно рассчитать ток в генераторе по формуле:

$$I_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_g^3 \cdot \varepsilon_t}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot S_g \cdot N_g \cdot S_t \cdot N_t}, \quad (5)$$

где R_g – радиус генераторной катушки, м; ε_t – амплитудное значение э.д.с. с датчика тока, В; S_t – площадь катушки датчика тока; N_t – количество витков в датчике тока.

Конечное представление целевой функции, подлежащей минимизации, имеет вид:

$$E(A_1, C_1) = \sum_k (x_k - [A_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)_k - C_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)_k])^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где k – это индекс элемента дискретной записи сигнала.

После нахождения неизвестных весовых коэффициентов (A_1, C_1) целевой функции (6), амплитуда и фаза полезного сигнала рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{cases} \varphi = \arctg [(A_1 - A) / -C_1] \\ C = C_1 / \cos(\varphi). \end{cases} \quad (7)$$

Прототипирование разрабатываемой аппаратуры

Чтобы оценить возможность применения разработанного способа подавления сигнала от прямого поля при полевых работах, и чтобы иметь возможность отладить работу цифрового фильтра, а также понять его недостатки и ограничения, была реализована базовая функциональность разрабатываемой аппаратуры на базе ЭМС. На корпус трехкатушечного прибора были закреплены: одинаковые приемная катушка и датчик тока (радиус 46 мм, 50 витков), а также усилитель (УС) с коэффициентом усиления 119, аккумулятор и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с разрядностью 14 бит и частотой дискретизации до 10 МГц, который можно подключать к компьютеру для управления и сбором данных (рис. 1. (а)).

Подобное моделирование (рис. 1. (а)) разрабатываемой аппаратуры дает возможность не только проверить работоспособность алгоритма фильтрации и отладить работу, но и сравнить двухкатушечную аппаратуру с цифровым способом подавления прямого поля с существующей трехкатушечной аппаратурой ЭМС при идентичных условиях в ходе проведения экспериментов.

На сегодняшний день выполнен эксперимент, который демонстрирует работоспособность алгоритма фильтрации и который показывает перспективность развития применения цифрового способа подавления прямого поля.

Суть эксперимента заключалась в передвижении алюминиевого ящика под неподвижной аппаратурой с закрепленными на ней внешней приемной катушкой

в плоскости с генератором и внешним датчиком тока на крышке генератора (рис. 1. (а)), что соответствует предлагаемому устройству аппаратуры [7].

Схема эксперимента представлена на рисунке 1 (б). Алюминиевый ящик имел размеры (Д x Ш x В) 585 x 385 x 240 мм, перемещение ящика осуществлялось с шагом 200 мм от начала координат до отметки 4400 мм, расстояние от пола до оси аппаратуры было 7800 мм, дальняя приемная катушка ЭМС, ближняя приемная катушка ЭМС, внешняя приемная катушка, центр генератора и центр внешнего датчика тока находились на расстояниях 1109 мм, 2109 мм, 2509 мм и 3409 мм от центра ящика соответственно.

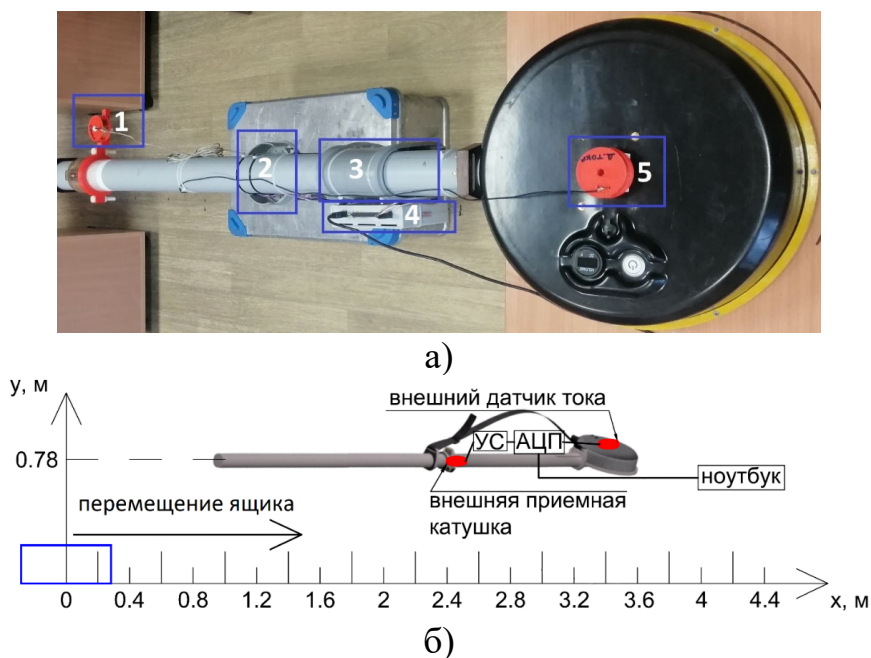


Рис. 1. Реализация разрабатываемой аппаратуры на базе ЭМС (1 – внешняя приемная катушка, 2 – усилитель, 3 – аккумулятор, 4 – АЦП, 5 – внешний датчик тока, а), условная схема эксперимента (б)

Регистрация данных была выполнена синхронно с работой аппаратуры ЭМС. Для обеспечения синхронизации измеренных данных, на ноутбуке с помощью специального программного обеспечения, начиналась запись сигналов от датчика тока и от приемной катушки после усилителя с частотой дискретизации 1 МГц в течении трех секунд, после чего запускалось разовое измерение аппаратурой ЭМС на 4-х частотах (2.5, 3.086, 3.906 и 5.102 кГц), соответственно внешней приемной катушкой и внешним датчиком тока регистрировался сигнал в момент работы генератора, исходные зарегистрированные данные представлены на рисунке 2.

Измерения проводились с накоплением измерений на одной точке профиля для получения объективных данных о влиянии шума на результаты измерений существующей аппаратуры и результаты работы алгоритма фильтрации, а также

для наглядного различия изменения сигнала, связанного с проводящим объектом, от случайного изменения регистрируемого сигнала.

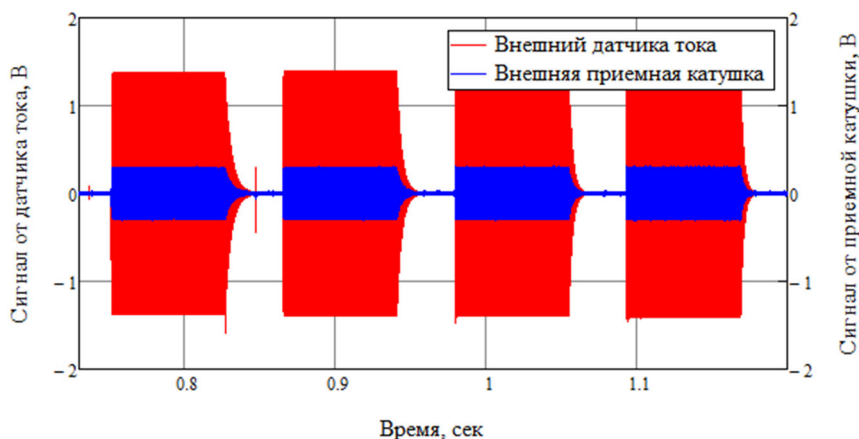


Рис. 2. Исходные зарегистрированные сигналы от внешней приемной катушки после усилителя и внешнего датчика тока

Результаты

Для получения амплитудных значений полезного сигнала от проводящего объекта вблизи аппаратуры после подавления прямого поля, исходные данные (рис. 2) были разбиты на сэмплы по 100 периодов и отфильтрованы в соответствии с запатентованным способом, подробно описанным в работе [7]. Полученные результаты представлены на рисунке 3. Первые 14 измерений регистрировались, когда центр ящика находился в начале координат, после смещения ящика на 200 мм было сделано 4 измерения, на последующих позициях ящика вдоль профиля запись данных была по 3 точки и, когда центр ящика находился на отметке 4400 мм, было выполнено 7 измерений. Длина профиля была ограничена размерами помещения, в котором проводился эксперимент.

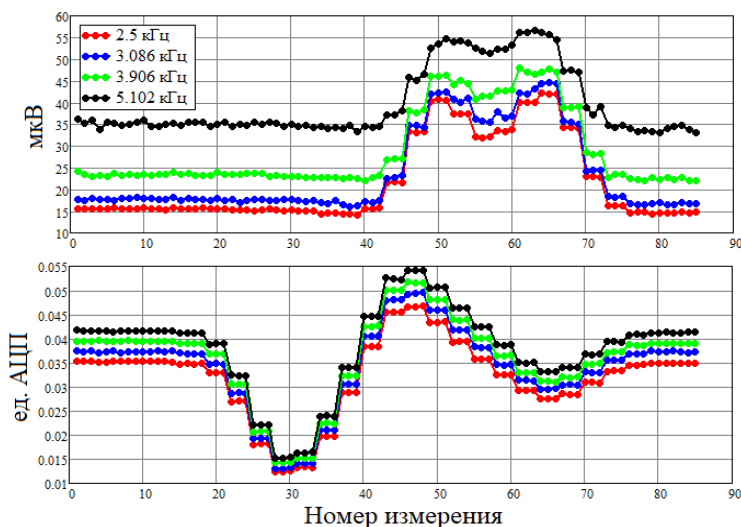


Рис. 3. Амплитуда полезного сигнала в приемной катушке после фильтрации (сверху), нормированный на ток сигнал ЭМС (снизу)

Для сопоставления позиции проводящего объекта под аппаратурой и анализа полученных результатов были взяты усредненные значения на каждой позиции ящика вдоль профиля (рис. 4).

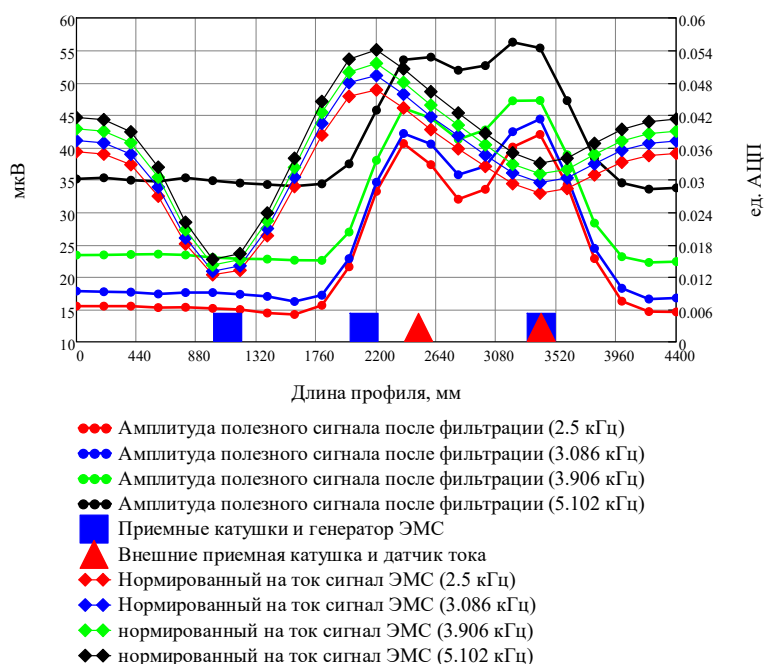


Рис. 4. Усредненная амплитуда полезного сигнала в приемной катушке после фильтрации и усредненный нормированный на ток сигнал ЭМС

Заключение

На сегодняшний день созданный оригинальный метод [7] подавления сигнала прямого поля, основанный на анализе теории цифровой фильтрации, прошёл проверку через многочисленные лабораторные экспериментальные тестирования. Проведённые эксперименты с реальными данными указывают на потенциал создания двухкатушечной аппаратуры частотного электромагнитного зондирования с блоком цифровой фильтрации.

В ходе проведенных исследований были получены значимые результаты, указывающие на недостатки цифрового способа компенсации сигнала от поля генератора в приемном тракте аппаратуры. На рисунке 3 амплитуда полезного сигнала после фильтрации на частоте 2.5 кГц сопоставима по характеру с результатами работы трехкатушечной аппаратуры, при неизменном положении ящика на каждой позиции. Однако, с увеличением частоты (5.102 кГц) на данных после фильтрации «полочки» становятся менее выраженными, что может быть связано с меньшим коэффициентом усиления сигнала, чем в приборе ЭМС, либо с уменьшением дискретизации исходных данных, поскольку для всех регистрируемых частот она была одинаковой.

В целом, полученные результаты дают ценную информацию для дальнейшего анализа работы алгоритма цифровой компенсации прямого поля, а работа

с исходными данными в избыточном количестве позволит оптимизировать и отладить код для корректной работы перед реализацией в виде отдельной платы, встраиваемой в аппаратуру. Собранный прототип на базе ЭМС в дальнейшем позволит выполнить ряд экспериментов для оценки цифровой компенсации и сравнения получаемых результатов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манштейн А.К., Эпов М.И., Воевода В.В., Сухорукова К.В. Способ индукционного частотного зондирования: пат. RU № 2152058 С1; заявитель и патентообладатель Институт геофизики СО РАН; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18. 4 с.
2. Манштейн А.К., Эпов М.И., Балков Е.В., Сухорукова К.В. Способ калибровки устройства для наземного электромагнитного частотного зондирования: пат. RU № 2461850 С2; заявитель и патентообладатель Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; опубл. 20.09.2012 Бюл. № 26. 4 с.
3. Балков Е.В., Манштейн А.К. Сравнение характеристик двух- и трехкатушечной реализации индукционных зондов для малоглубинного частотного зондирования / Геофизический вестник. - 2006. - №1. - С.12-17.
4. Манштейн А.К., Балков Е.В. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования: пат. RU № 2502092 С2; заявитель и патентообладатель Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
5. West G.F., Walker P.W., Polzer B.D. Magnetic compensation circuit and method for compensating the output of a magnetic sensor, responding to changes in a first magnetic field: pat. US Pub.No.: 9389281 B2; Application Vale S. A.; pub. Date 12.07.2016. 12 p.
6. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: техника, 2013. – 528 с.
7. Манштейн А.К., Соколов П.А. Способ подавления сигнала прямого поля в электромагнитном индукционном зондировании и устройство для его реализации / Заявка RU 2023 121 274 А. Опубликовано: 23.04.2024 Бюл. № 12, 14 с.
8. Митрофанов Г.М. Обратные задачи геофизики. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. – 101 с.
9. Параснис Д.С. Принципы прикладной геофизики; перевод с английского С. Д. Виноградова; под редакцией В. Н. Жаркова. – М.: Мир, 1965. - 200 с.
10. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть 2. Электромагнитные поля. – М.: Недра, 2000. – 483 с.

© П. А. Соколов, А. К. Манштейн, 2025