

*А. К. Маништейн<sup>1\*</sup>, П. А. Соколов<sup>1,2</sup>*

## **Применение цифровой обработки сигналов в устройствах электромагнитного зондирования**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** В работе представлены первые результаты разработанного способа выделения полезного сигнала с помощью цифровой фильтрации в процессе работы геофизической аппаратуры при исследовании геологической среды в наземном и скважинном вариантах. Разработанный макет моделирует работу аппаратуры частотного электромагнитного зондирования, управляется с помощью персонального компьютера и позволяет записывать и обрабатывать регистрируемые сигналы на базе быстродействующего модуля АЦП. Описывается способ выделения характеристик полезного сигнала и процентная оценка подавления прямого поля в приёмном сигнале. Актуальность работы обуславливается малым подавлением прямого поля, а также эффектом занижения полезного сигнала в существующей аппаратуре и увеличением стоимости конструкторских решений подавления сигнала прямого поля.

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

*A. K. Manstein<sup>1\*</sup>, P. A. Sokolov<sup>1,2</sup>*

## **Application of digital signals processing in electromagnetic sensing equipment**

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The work presents the first results of the developed method of extraction of useful signal by means of digital filtering in the process of work of geophysical equipment in the study of the geological environment in the ground and borehole variants. The developed model simulates the operation of equipment for frequency electromagnetic sounding, has control with a personal computer and allows recording and processing of recorded signals, based on a fast-acting ADC module. Method described of detection of characteristics of a useful signal and percentage estimation of suppression of a direct field in the receiving signal. The relevance of the work is caused by a small suppression of the direct field, the effect of reducing of the useful signal in the existing equipment and the increasing cost of design solutions suppression of the direct field signal.

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

## *Введение*

Работа посвящена развитию аппаратуры электромагнитных наземных и скважинных зондирований. Общей проблемой большого количества модификаций данных приборов является выбор способа выделения полезного сигнала. В геофизических устройствах для электромагнитного индукционного зондирования локальные неоднородности удельного сопротивления породы выявляются при создании электромагнитного поля генераторной катушкой и измерении сигнала от токов, индуцированных в земле [1, 2]. На приёмную катушку действует переменное магнитное поле нескольких источников. Магнитное поле от тока в генераторной катушке, которое индуцирует э.д.с. прямого поля в приёмной катушке и в это же время наводит ток в породе или проводящих объектах, находящихся вблизи устройства. Переменное магнитное поле от наведённого тока называется вторичным полем, и оно создаёт в приёмной катушке полезный сигнал, величина которого обратно пропорциональна удельному сопротивлению вмещающей среды. Недостатком подобной аппаратуры является малое подавление прямого поля и уменьшение полезного сигнала. Большая величина э.д.с. от первичного поля выступает в качестве помехи.

Так, например, в индукционном многочастотном трёхкатушечном зонде подавление сигнала первичного поля обеспечивается использованием разностной схемы включения двух приёмных катушек. Такой способ позволяет подавлять сигнал первичного поля в 400 - 1000 раз по сравнению с величиной сигнала в приёмной катушке двухкатушечного зонда, но при этом происходит уменьшение сигнала вторичного поля [3]. Расчёты показывают, что при идеальной фазировке реальной составляющей величина разностного сигнала трёхкатушечного зонда над средой примерно в 1.7 раза меньше, чем реальная составляющая двухкатушечного зонда [3]. Эффективная работа трёхкатушечного зонда в многочастотном режиме возможна при выполнении условия компенсации прямого поля на всех частотах, что является сложной технической задачей, требующей сохранения моментов приёмных катушек в частотном рабочем диапазоне [4].

Несовершенство аппаратуры, преобладание помехи над полезным сигналом и внешние электромагнитные шумы, которые являются не постоянными, но регистрируются датчиком тока внутри генераторной петли, накладывают ограничения на глубокое подавление составляющей сигнала от прямого поля с целью выделения полезного сигнала с приёмной катушки зонда. Оптимальное решение в настоящее время может быть достигнуто применением цифровой фильтрации. Поскольку спецификацию к передаточной функции фильтра невозможно сформулировать заранее, или спецификация может изменяться в процессе работы фильтра, то вместо фильтров с фиксированными параметрами целесообразно использовать фильтры с изменяемыми параметрами – адаптивные фильтры.

Адаптивный фильтр – это фильтр с изменяемыми параметрами, как правило, весовыми коэффициентами (ВК). Особенности, отличающие адаптивные системы от других видов нелинейных систем следующие: во-первых, адаптивные системы являются регулируемыми, и процессы их регулирования зависят от

усреднённых в ограниченном интервале времени характеристик сигнала, а не от мгновенного значения сигналов или мгновенных значений внутренних состояний системы; во-вторых, процессы регулирования адаптивных систем целенаправленно изменяются для того, чтобы оптимизировать заданные параметры функционирования [5].

Подавление прямого поля в аппаратуре частотного электромагнитного зондирования, используя цифровую обработку сигналов, является актуальной задачей, которая ранее не решалась в геофизической отрасли, и решение её может послужить толчком прогрессу геофизического приборостроения.

### **Целевая функция**

В процессе работы адаптивного алгоритма осуществляется поиск весовых коэффициентов, при которых значение заданной целевой функции при заданном наборе параметров является минимальным. Обычно это функция входного, выходного и образцового сигналов. Целевую функцию можно рассматривать и как функцию ошибок. Она должна быть действительной и не отрицательной для всех значений сигналов, используемых в обработке. Достижение минимума этой функции является критерием работы адаптивного фильтра [5].

Ввиду многомерности задачи, в качестве целевой функции использовалась функция, содержащая математическую модель сигнала с приёмной катушки с неизвестными весовыми коэффициентами, при изменении которых невязка между измеренным сигналом с приёмной катушки и теоретическим сигналом математического моделирования в целевой функции стремилась к минимуму. Такой подход широко известен и применяется для решения обратных задач [6]. Целевая функция:

$$E = \sum_k \left( x_k - [A_1 \cdot d_k / -d_{amp} - C_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)]_k \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k$  – это индекс элемента дискретной записи сигнала;  $x_k$  – сигнал с приёмной катушки, В;  $d_k$  – сигнал с датчика тока, В;  $d_{amp}$  – амплитудное значение сигнала с датчика тока, В;  $f$  – частота, Гц;  $t$  – время, сек. Весовые коэффициенты  $A_1$  и  $C_2$  зависят от величины прямого поля и полезного сигнала в приёмной катушке. После нахождения значений коэффициентов, при которых значение целевой функции (1) минимально, фаза ( $\varphi$ ) и амплитуда полезного сигнала ( $C'$ ), несущие информацию об электропроводности объекта, рассчитывались по формулам:

$$\varphi = \arctg \left[ (A_1 + A) / C_2 \right], \quad (2)$$

$$C' = C_2 / \sin(\varphi), \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала прямого поля в приёмной катушке, В:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot S_g \cdot N_g \cdot I_0 \cdot S_t \cdot N_t / (4 \cdot \pi \cdot L^3), \quad (4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $S_g$  – площадь генераторной петли, м<sup>2</sup>;  $N_g$  – количество витков в генераторной петле;  $I_0$  – амплитуда тока, протекающего в цепи, А;  $S_t$  – площадь катушки датчика тока;  $N_t$  – количество витков в датчике тока.  $L$  – расстояние от центра генераторной петли до центра приёмной катушки.

Стоит отметить, что нахождение истинной амплитуды и фазы полезного сигнала возможно при условии, что целевая функция будет иметь единственный минимум в области допустимых значений, достаточность этого доказывалась вычислением производных Фреше. Разработанная целевая функция, полученная на основе трудов [7, 8, 9, 10].

### **Макет аппаратуры электромагнитного зондирования с цифровой фильтрацией**

Технология подавления сигнала прямого поля с помощью цифровой фильтрации тестировалась физическим моделированием. Устройство состояло из генераторной катушки; генератора гармонических сигналов; датчика тока в виде катушки малого диаметра, дающей информацию о прямом поле, установленной внутри генераторной катушки; а также одну или набор приёмных катушек, сигналы от которых через соответствующие цепи преобразовываются в цифровой вид.

В макете аппаратуры применялся генератор гармонических сигналов ГЗ-112/1; усилитель мощности EP4000; усилитель сигнала от приёмной катушки, разработанный на основе микросхемы INA163 с коэффициентом усиления 119; а также быстродействующий модуль АЦП E20-10 (разрядность АЦП 14 бит, частота работы АЦП до 10 МГц) с пределом допускаемой относительной основной погрешности частоты преобразований АЦП -  $\pm 0.005\%$ , допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения переменного тока от  $\pm 0.2\%$  и с возможностью подключения к компьютеру для управления и сбора данных. Структурная схема макета представлена на рис. 1.

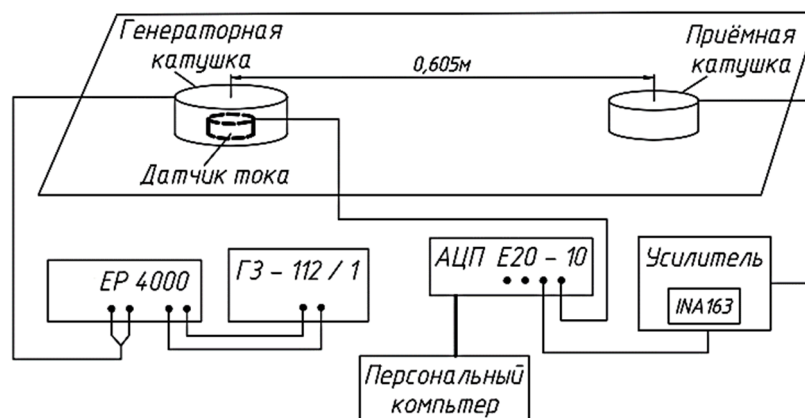


Рис. 1. Схема макета аппаратуры индукционного зондирования с использованием цифровой фильтрации

Метод поиска минимума целевой функции выбирался в соответствии с возможным применением алгоритма в реальном приборе. Был выбран фильтр на основе адаптивного алгоритма рекурсивных наименьших квадратов (RLS), поскольку при выводе RLS входные сигналы считаются детерминированными, а также данный алгоритм демонстрирует быструю сходимость по сравнению с большинством своих конкурентов [5]. Однако в установившемся режиме значения весовых коэффициентов адаптивных фильтров могут находиться в окрестности истинного минимума [5] из-за присутствия в регистрируемых сигналах собственных и внешних шумов. Поэтому для проверки и уточнения ВК использовался метод Нелдера-Мида, также известный как метод деформируемого многогранника и симплекс-метод [11, 12].

### *Проверка работы алгоритма*

При измерении электропроводности окружающего пространства вблизи индукционного зонда, авторы следовали принципу наложения полей и не изменяли первичный сигнал в процессе его регистрации. Данные измерялись и регистрировались при размещении макета в воздухе при нормальных условиях. При моделировании проводящего объекта использовалось замкнутое проволочное кольцо, расположенное под плоскостью установки на одной оси с генераторной катушкой [4, 13].

Для проверки работы алгоритма выполнены эксперименты, моделирующие ситуацию расположения прибора в воздухе (рис. 2. а), когда полезный сигнал равен нулю, и с замкнутым кольцом (рис. 2 б), лежащим параллельно плоскости макета на глубине 0.22 м, создающим полезный сигнал в приёмной катушке. Кольцо сделано из медного провода сечением 1.5 мм со средним радиусом 0.247 м. Далее приводятся результаты экспериментов при частоте тока 3 и 10 кГц в генераторной петле и при различной амплитуде тока.

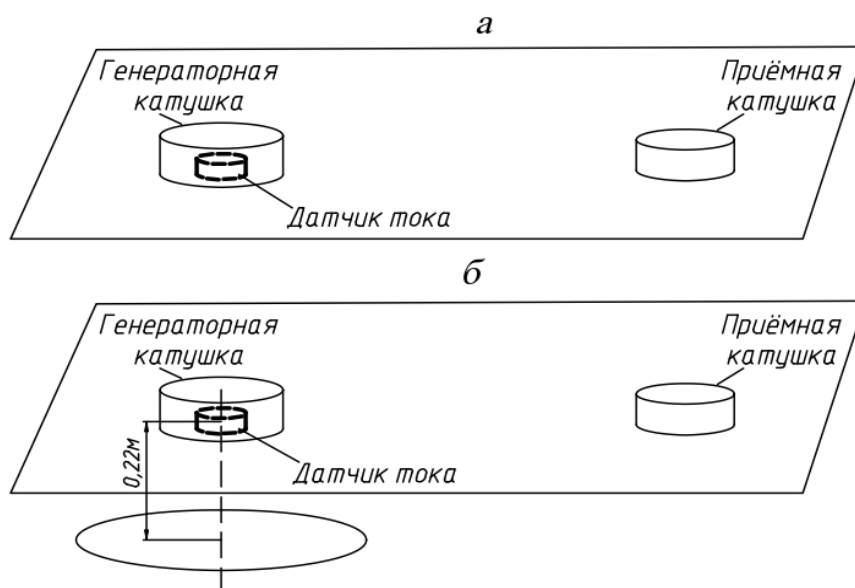


Рис. 2. Схема экспериментов для проверки работы фильтрации

Расстояние между центром генераторной катушки и центром приёмной катушки 0.605 м. Параметры датчика тока, приемной катушки и генераторной катушки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры катушек установки физического моделирования

Катушка	Радиус, м	Кол – во витков	Индуктивность, мкГн	Сопротивление на постоянном токе, Ом	Частота собственного резонанса, кГц
Генераторная	0.051	100	1465	0.71	280
Датчика тока	0.011	10	2.5	0.3	3000
Приёмная	0.035	50	312.2	1.44	560

Данные регистрировались с частотой дискретизации 500 кГц. На каждой частоте записывалось десять периодов с синхронизацией по каналу сигнала от датчика тока с помощью программного обеспечения «LGraph2», предназначенного для модуля АЦП E20-10. Далее проводилась подготовка данных в среде «MathCAD» и после чего данные фильтровались без изменения входных сигналов в соответствии с алгоритмом, описанным ранее в тексте, в программе «GNU Octave». Результаты фильтрации сравнивались с теоретическим расчётом магнитных полей с дипольными источниками и приёмниками [4, 7, 8, 9, 10, 13], они представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты применения цифровой фильтрации для выделения полезного сигнала при наличии замкнутого кольца под генераторной катушкой

Частота и амплитуда тока в генераторе	3000.4 Гц, 6.351 А		10003.2 Гц, 2.009 А	
	Теория	Фильтрация	Теория	Фильтрация
Амплитуда полезного сигнала, мВ	0.556	0.538	0.897	0.909
Погрешность, %	3.237		1.349	
Фаза полезного сигнала, °	29.368	29.3	53.044	53.000
Погрешность, %	0.229		0.082	

При размещении прибора в воздухе в отсутствие замкнутого кольца, приемная катушка регистрирует только сигнал прямого поля, однако в реальных условиях данные с приемной катушки могут содержать собственные помехи аппаратуры или внешние помехи, которые не будут учитываться датчиком тока. Для практического применения в алгоритм необходимо ввести оценку, которая позволит учитывать искажения сигналов в реальной аппаратуре. Для этого после нахождения коэффициентов, при которых целевая функция (1) будет иметь минимальное значение, перед расчетом характеристик полезного сигнала по фор-

мулам (2) и (3) выполняется проверка наличия полезного сигнала с приемной катушки. Учитывая то, что коэффициент  $A_1$  определяется характеристиками полезного сигнала и прямого поля, а коэффициент  $C_2$  только характеристиками полезного сигнала, нахождение относительной погрешности между рассчитанным амплитудным значением прямого поля по формуле (4) с найденным коэффициентом  $A_1$ , позволяет оценить наличие полезного сигнала в регистрируемых данных. Если вычесть полученное значение из 100%, то будет получена процентная оценка подавления прямого поля методом цифровой обработки сигналов. Так для частоты 3000.4 Гц коэффициент  $A_1 = 8.66 \cdot 10^{-3}$ , а амплитудное значение прямого поля по формуле (4) равняется  $8.662 \cdot 10^{-3}$ , соответственно процентная оценка подавления прямого поля равна 99.98%, и для частоты 10003.2 Гц, амплитудное значение прямого поля равно  $9.152 \cdot 10^{-3}$ , коэффициент  $A_1 = 9.101 \cdot 10^{-3}$ , и тогда, на этой частоте, прямое поле удалось подавить на 99.44%. При обработке данных с макета было принято, что если оценка помехи (прямого поля) больше 95% процентов, то полезный сигнал в измеренных данных отсутствует.

### ***Заключение***

Разработанный метод цифровой обработки сигналов обеспечивает нахождение амплитуды и фазы полезного сигнала. Физическое и математическое моделирование сигналов в генераторной и приёмной катушках показывают близкие совпадения с теоретическими оценками.

Разработанный на основе анализа теории адаптивной фильтрации оригинальный метод подавления сигнала прямого поля, включает в себя основные аспекты фильтрации и необходимые условия, которыми должен обладать алгоритм фильтрации.

Выполнены эксперименты, показывающие совпадение между приближенным расчетом характеристик полезного сигнала и обработанных данных со стенда, моделирующего работу аппаратуры электромагнитного зондирования (таблица 2).

В дальнейшем планируется анализ алгоритма, рассмотрение разных ситуаций регистрируемого сигнала, усовершенствование и оптимизация алгоритма для возможности применения в реальной аппаратуре.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0266-2022-0025. Авторы выражают признательность за оказанную помощь при обсуждении математических трудностей в выполненных исследованиях Никитенко Марине Николаевне, д.т.н., в.н.с. и Айзенбергу Аркадию Марковичу, к.ф.-м.н., с.н.с.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Патент RU № 2152058 С1, опубликовано 27.06.2000 Бюл. № 18
2. Патент RU № 2502092 С2, опубликовано 20.12.2013 Бюл. № 35
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. Патент RU № 2461850 С2, опубликовано 20.09.2012 Бюл. № 26
5. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: техно-сфера, 2013. – 528 с.
6. Митрофанов Г.М. Обратные задачи геофизики. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. – 101 с.
7. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть 2. Электромагнитные поля. – М.: Недра, 2000. – 483 с.
8. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
9. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике: 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
10. Параснис Д.С. Принципы прикладной геофизики; перевод с английского С. Д. Виноградова; под редакцией В. Н. Жаркова. – М.: Мир, 1965. - 200 с.
11. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: перевод с английского. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
12. Лыткина Л.И. Методы оптимизации с программами в системе MATHCAD: Учебное пособие. Красноярск, 2001. – 88 с.
13. Балков Е.В., Манштейн А.К. Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании // Геофизический вестник. - 2001. - №12. - С.17-20.

© А. К. Манштейн, П. А. Соколов, 2023