

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

## **Цифровая фильтрация при измерении малых сигналов: оценка помехоустойчивости и чувствительности**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: sokolovpa@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Работа посвящена развитию геофизической аппаратуры частотного электромагнитного зондирования. Исследование направлено на улучшение характеристик измерительного тракта аппаратуры посредством применения адаптивного фильтра подавления помех. В статье представлено исследование помехоустойчивости измерительного тракта макета аппаратуры при воздействии нефазированного источника электромагнитного поля. Экспериментально определено условие обеспечения полосы пропускания. Предложена оценка чувствительности измерения полезного сигнала к изменению характеристик исследуемой среды.

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

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

## **Digital filtering for measuring small signals: evaluation of noise immunity and sensitivity**

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

**Abstract.** The work is devoted to the development of geophysical equipment for electromagnetic frequency sensing. The research aims to improve the characteristics of the measuring path of equipment by using an adaptive interference suppression filter. The paper presents a study on the noise immunity of the equipment's measuring path under the influence of a non-phase electromagnetic field source. Experimental determination of the bandwidth provision condition was carried out. An assessment is proposed for the sensitivity of measurement of a useful signal with respect to changes in the characteristics of a medium under study.

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

### ***Введение***

Геофизические методы сегодня являются основными средствами изучения структуры окружающей среды и объектов на глубине до нескольких метров. За последнее десятилетие технологическое развитие и модернизация отдельных отраслей позволили разным наукам, в том числе и геофизике, повысить свою эффективность за счёт улучшения производительности программного обеспечения

и применения цифровой фильтрации при обработке данных. В свою очередь, геофизическая аппаратура за это же время претерпела относительно небольшие изменения, сохранив большинство дорогостоящих конструктивных решений [1].

Применение геофизических приборов неизбежно сопровождается обнаружением некоторых их недостатков. Таких как большая масса, временные затраты, уязвимость к внешним помехам (например, одночастотное картирование или магниторазведка), наличие в приемном сигнале измерителя первичного сигнала от генератора, превосходящего полезный сигнал, и так далее.

Геофизические электромагнитные зонды используют генераторную катушку для создания электромагнитного поля, которое вызывает индуцированные токи в земле. Эти токи создают локальные вариации удельного сопротивления горных пород, которые можно обнаружить, измеряя изменения в электромагнитном поле [2, 3]. Для подобных устройств извлечение полезных данных с приемной катушки затруднено из-за того, что сигнал от поля генератора значительно превосходит уровень полезного сигнала от индуцируемых токов. На сегодняшний день, известен зарубежный метод компенсации наиболее близкий к разработанному [4]. В патенте US9389281 описывается способ обнаружения слабого магнитного поля, заключающийся в адаптивном формировании компенсационного сигнала первичного магнитного поля. При такой схеме подавления, недостатком аппаратуры является многократное цифро-аналоговое преобразование (ЦАП) данных от магнитного датчика, в ходе которого может происходить «смещение нуля» согласно описанию характеристик ЦАП, а также согласно теории адаптивной фильтрации, в установившемся режиме значения весовых коэффициентов адаптивных фильтров могут находиться в небольшой окрестности истинного минимума [5], что в совокупности и по отдельности влияет на точность выделения полезного сигнала.

Модернизация действующей геофизической аппаратуры и разработка новых приборов нуждается в новых технологических решениях, соответствующих текущему уровню техники. Работа направлена на разработку способа подавления сигнала прямого поля в аппаратурно-программном электроразведочном комплексе, применяя цифровую обработку сигналов.

### ***Помехоустойчивость***

Представленный в работе [6] метод цифровой обработки сигнала обеспечивает нахождение амплитуды и фазы полезного сигнала в регистрируемых данных аппаратуры частотного зондирования. Однако целевая функция разработанного алгоритма фильтрации позволяет компенсировать сигнал прямого поля и не учитывает возможное наличие внешних нефазированных помех в сигнале с приемной катушки. Поэтому при эксплуатации аппаратуры с разработанным цифровым фильтром [6], в местах с наличием сторонних электромагнитных полей, в регистрируемых данных возможны искажения характеристик полезного сигнала. В радиотехнике для обеспечения передачи сигнала без существенного искажения (без влияния внешних электромагнитных помех) используется регулирование полосы пропускания, т.е. диапазона частот, в пределах которого АЧХ (ам-

плитудно-частотная характеристика) достаточно равномерна. Поэтому, для способности измерительной системы сохранять текущее состояние при воздействии внешних помех (помехоустойчивость), необходимо обеспечить достаточно узкую полосу пропускания [7]. При фиксированной частоте дискретизации регулирование полосы пропускания возможно при изменении времени наблюдения регистрируемого гармонического сигнала, что было подтверждено экспериментально.

В экспериментах использовался электромагнитный сканер ЭМС с основными параметрами, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры аппаратуры ЭМС

Радиус генераторной петли, мм	160
Расстояние по высоте от центра генераторной петли до центра датчика тока, мм	36.6
Радиус датчика тока, мм	11.1
Количество витков датчика тока	22
Радиус приёмной катушки, мм	35.5
Количество витков приемной катушки	50
Коэффициент усиления сигналов от приемника	119.4

Для экспериментального определения полосы пропускания приемного тракта аппаратура устанавливалась в воздухе при нормальных условиях. Таким образом в приемной катушке регистрировался только сигнал прямого поля от генераторной петли. Сигналы от датчика тока внутри генераторной петли и от приемной катушки с усилителем были подключены к АЦП (аналого-цифровой преобразователь) «E20-10» и регистрировались при частоте дискретизации 1 МГц с помощью программы на компьютере, позволяющей управлять записью данных. Во время эксперимента генератор работал на частоте 10 кГц, а время измерения варьировалось от 0,1 до 10 миллисекунд, что позволило получить от 1 до 100 периодов гармонического сигнала. К зарегистрированным сигналам с приемной катушки, состоящих из дискретных отсчетов, применялось дискретное преобразование Фурье (ДПФ). В результате преобразования была получена информация об амплитудном спектре анализируемых данных в виде массива комплексных чисел. Причём полученные спектры также являются дискретными с шагом равным (частота дискретизации)/(количество дискретных элементов). Полоса пропускания спектра определялась по уровню 0.7 от амплитудного значения, см. рис.1.

Было установлено, что в разрабатываемой цифровой аппаратуре частотного зондирования возможно обеспечить достаточно узкую полосу пропускания в 60 Гц, которая способна уменьшить влияние внешних помех на алгоритм компенсации прямого поля.

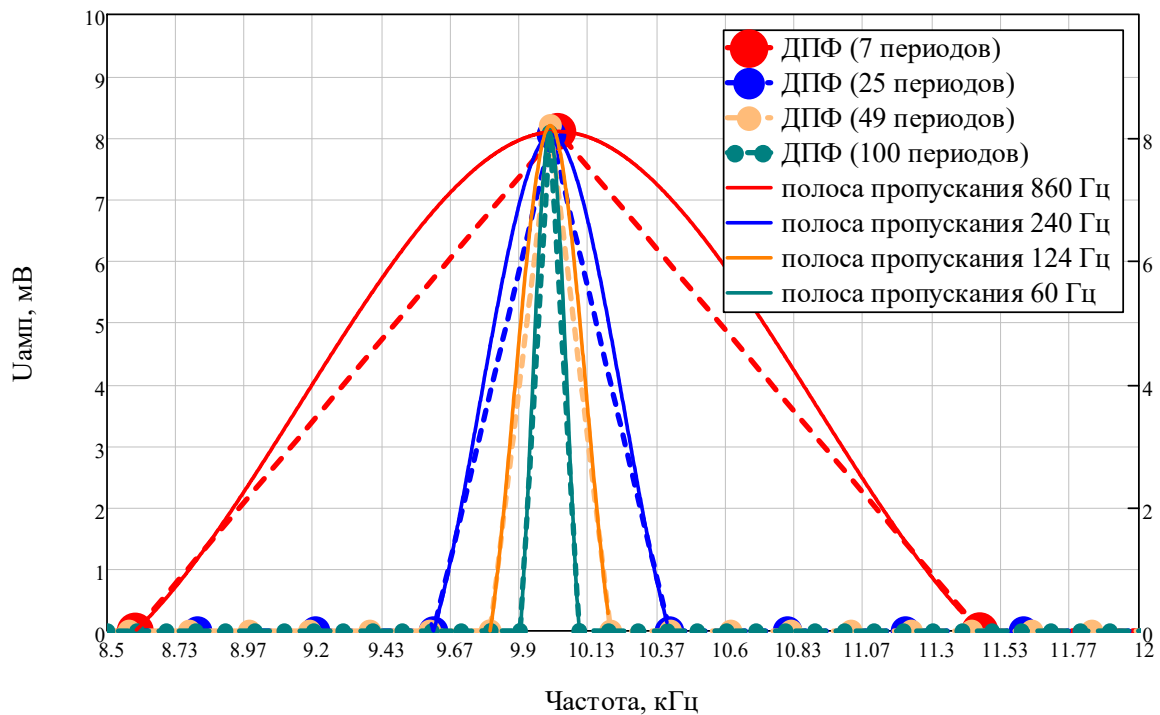


Рис. 1. Спектр сигналов приемного тракта

Для оценки влияния внешней помехи на выходные данные макета аппаратуры [6] были выполнены измерения электропроводности окружающего пространства вблизи макета индукционного зонда в присутствии внешнего источника электромагнитного поля. Измерения проводились согласно принципу наложения полей, и первичный сигнал в процессе его регистрации не изменялся. Для моделирования проводящего объекта использовалось замкнутое кольцо из медной проволоки, расположенное под плоскостью установки, примерно посередине между центрами приёмной катушки и генераторной петли. Параметры замкнутого кольца и его положение представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры замкнутого кольца и его положения

Средний радиус проволочного кольца, мм	248
Расчитанное сопротивление проволочного кольца, Ом	0.015
Расстояние от центра генераторной петли до центра проволочного кольца, мм	881
Расстояние от центра проволочного кольца до центра приемной катушки, мм	912

В качестве источника внешнего электромагнитного поля использовалась катушка, подключенная к генератору гармонических сигналов ГЗ-112/1, который

позволяет управлять амплитудой и частотой сигнала. Схема эксперимента представлена на рисунке 2.

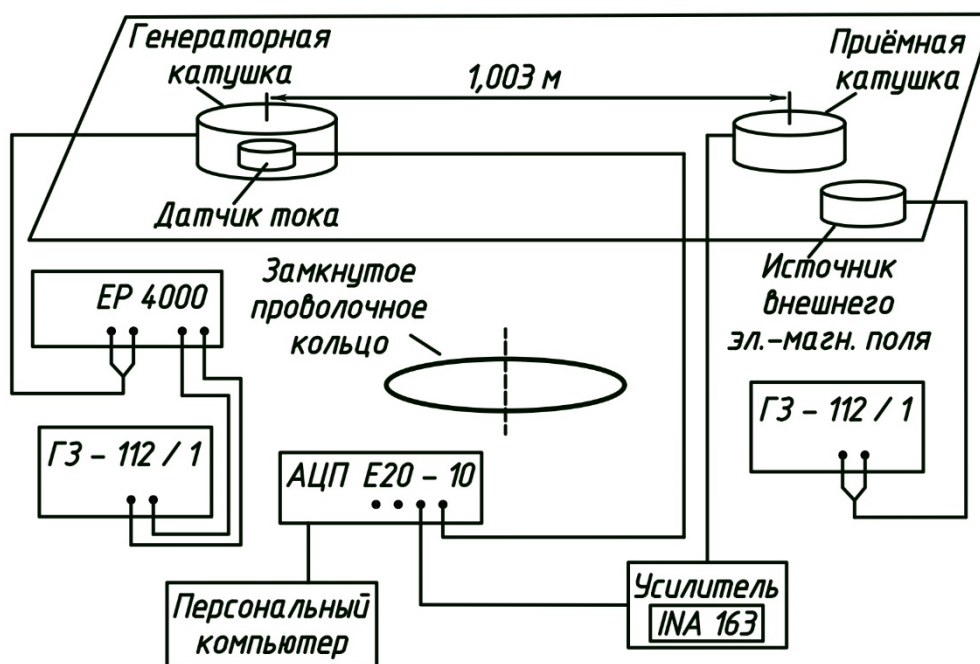


Рис. 2. Схема эксперимента

При воздействии переменного электромагнитного поля на замкнутое кольцо, оно становится излучателем вторичного электромагнитного поля, которое отличается от поля генератора согласно свойствам материала кольца. Зная параметры проволочного кольца (таблица 2) можно рассчитать в замкнутом кольце ток, возбуждаемый полем генератора, и рассчитать сигнал в приёмной катушке от вторичного поля.

Для исследования влияния внешней помехи на измерительный тракт в регистрируемых данных изменялась только частота помехи (на 1, 10, 20, 30, 50, 70, 100 и 500 Гц от частоты тока в генераторной катушке) и амплитуда сигнала помехи (амплитуда помехи была равна нулю; амплитуда помехи была в два раза меньше, чем амплитуда полезного сигнала; амплитуда помехи была равна амплитуде полезного сигнала; амплитуда помехи была в два раза больше, чем амплитуда полезного сигнала). Частота тока в генераторной петле равна 10 кГц. Частота дискретизации при регистрации сигналов равнялась 100 кГц. Для каждой точки записи выполнено шесть экспериментов подряд, в каждом из которых регистрировалось 100 периодов с синхронизацией по каналу сигнала от датчика тока с помощью программного обеспечения «LGraph2», предназначенного для модуля АЦП E20-10. Далее зарегистрированные сигналы фильтровались без изменения входных данных в соответствии с алгоритмом подавления прямого поля [6] в свободной программе для математических вычислений «GNU Octave». Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Результат влияния внешней помехи. Показано, что если частота помехи отличается от частоты генератора больше чем на 30 Гц, то помеха перестает влиять на измерение

### Чувствительность

Чувствительность измерительного тракта макета можно определить, как минимальное изменение в физическом свойстве или размерах элемента макета, которое приводит к измеримому изменению выходного сигнала системы [8]. Для разработанного макета, измеряемое изменение полезного сигнала возможно, при уменьшении возбуждаемого тока в проволочном кольце. Поэтому для оценки чувствительности измерительного тракта было решено изменять ток в кольце путем впайки резисторов с разным сопротивлением ( $R = 1, 2, 3, 4, 10, 20, 40 \text{ Ом}$ ), тем самым уменьшая индуцируемый ток и, соответственно, вторичное электромагнитное поле, порождающее полезный сигнал внутри приемной катушки. Положение замкнутого проволочного кольца представлено в таблице 3. Схема эксперимента представлена на рисунке 4.

## Положение замкнутого кольца

Расстояние от центра генератора до центра кольца, мм	580
Расстояние от центра кольца до центра приемной катушки, мм	635

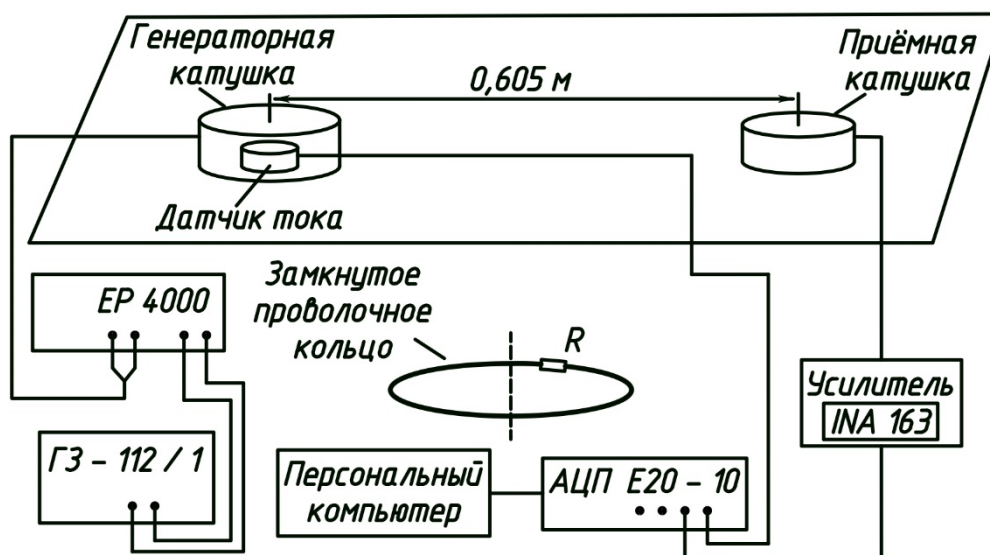


Рис. 4. Схема эксперимента

Регистрация данных производилась при аналогичных предыдущему эксперименту условиях и параметрах макета, за исключением частоты генератора аппаратуры, отсутствия внешних помех и расстоянием между центром генератора и приемной катушки (0.605 м). Для работы была выбрана частота генератора 3 кГц. В рамках проведенного эксперимента минимальное различие в свойстве определяется сопротивлением резистора в 1 Ом. Результаты эксперимента представлены на рисунке 5.

Ввиду того, что полученные результаты имеют характер степенной функции (гипербола), согласно закону Ома (электромагнитное поле генератора осталось неизменным во всех экспериментах), для оценки чувствительности было принято решение использовать линейную аппроксимацию полученных результатов при 1, 2, 3 и 4 Ом. Полученное уравнение регрессии имеет вид:  $y(x) = -4.07 \cdot x + 195.92$ , тогда чувствительность, определенная отношением изменения амплитуды полезного сигнала к изменению суммарного сопротивления кольца, равна 4.07 мкВ/Ом.

Полученные результаты эксперимента указывают на необходимость определения оптимальных параметров аппаратуры, таких как момент генератора и момент приемной катушки, для повышения полезного сигнала вторичного поля.

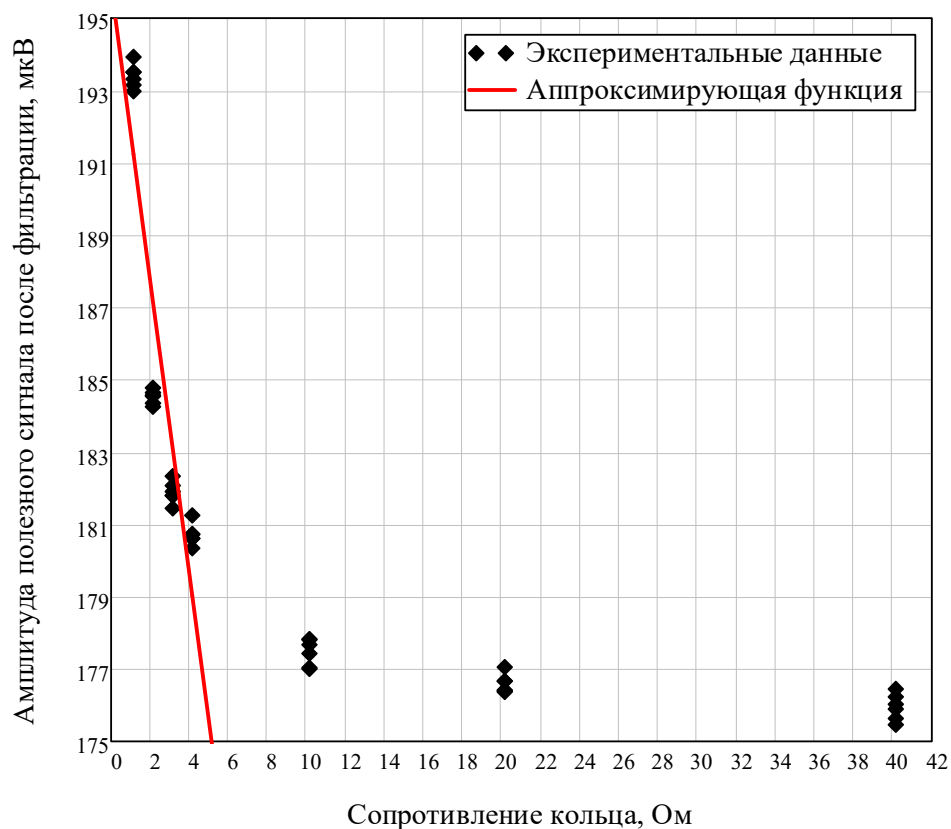


Рис. 5. Чувствительность измерительного тракта

### Заключение

На сегодняшний день созданный оригинальный метод (патент RU № 2152058 С1) подавления сигнала прямого поля, основанный на анализе теории цифровой фильтрации, и разработанный стенд для проверки алгоритма работы аппаратуры прошли проверку через многочисленные экспериментальные тестирования. Проведённые эксперименты показывают возможным прототипирование аппаратуры частотного электромагнитного зондирования с блоком цифровой фильтрации.

В ходе проведенных исследований были получены значимые результаты для определения характеристик измерительного тракта разрабатываемой аппаратуры. Исследование помехоустойчивости измерительного тракта помогло определить необходимые условия для обеспечения узкой полосы пропускания. Кроме того, экспериментально была определена чувствительность измеряемых величин полезного сигнала к изменениям характеристик исследуемой среды. В целом, полученные результаты указывают на потенциал улучшения процесса зондирования и повышения эффективности геофизических изысканий при использовании данной аппаратуры. В ходе данного исследования было подтверждено эффективное подавление сигнала прямого поля и шумов от сторонних источников электромагнитного поля близких частот при использовании цифрового способа фильтрации.



## *Благодарности*

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е.В., Фадеев Д.И. Обзор современного аппаратного и программного обеспечения малоглубинных электромагнитных зондирований в частотной области: Геофизические технологии, № 1, 2021. – 52-72 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы: М.: техносфера, 2013. – 528 с.
6. Манштейн А.К., Соколов П.А. Применение цифровой обработки сигналов в устройствах электромагнитного зондирования: Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XIX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – 2023. – Т. 2. – № 3. – 285-292 с.
7. Кудряков С. А. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие.: С. Пб.: Свое издательство, 2015. – 340 с.
8. Шеин А. Н., Юдицких Е.Ю., Потапов В.В., Калганов А. С. Лабораторный практикум по электроразведке: Забайкал. гос. ун-т.- Чита: ЗабГУ, 2018. – 125 с.

© П. А. Соколов, А. К. Манштейн, 2024