

Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований

■ М.В. Шарлов, АО «ИЭРП», г. Иркутск

Введение

Методы нестационарных электромагнитных зондирований, в частности, зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), широко применяются для изучения электрических свойств геологического разреза в большом интервале глубин. Объем работ методом ЗСБ в Восточной и Западной Сибири в последние годы значительно возрос. Востребованными являются исследования ЗСБ как в глубинной, так и в малоглубинной модификациях для решения нефтегазопроисловых, гидрогеологических, геотехнических задач, для изучения зон распространения многолетнемерзлых пород и др.

Аппаратное обеспечение метода ЗСБ состоит из возбуждающей (генератор, коммутатор тока, источник поля) и измерительной (датчик поля, измеритель/регистратор) систем. В результате импульсного воздействия, вызванного быстрым выключением тока в источнике (генераторной петле или линии), в геологической среде возникает переходный процесс (становление поля), который регистрируется датчиком в виде изменяющейся во времени ЭДС. В зависимости от подхода, реализованного в измерительной системе, данные на выходе регистратора могут представлять либо готовую кривую становления, т.е. последовательность осредненных (накопленных) значений ЭДС с нарастающим (логарифмическим) шагом по времени, либо серию временных рядов, отсчеты которых получены с АЦП с исходным арифметическим шагом дискретизации по времени. Для систем, выдающих «сырые» данные, получение итоговой кривой становления производится путем

фильтрации и осреднения исходных данных на более позднем этапе обработки на компьютере.

Несмотря на более сложный процесс получения итоговой кривой становления, подход, основанный на регистрации сигналов с арифметическим шагом дискретизации, имеет преимущество, выражающееся в более сильной помехозащищенности системы. Данные, записанные с частым постоянным шагом по времени, дают возможность последующей цифровой обработки сигналов (ЦОС), и, таким образом, улучшения соотношения сигнал/шум (SNR) путем учета параметров помехи, регистрируемой вместе с полезным сигналом [1].

Следует отметить, что системы, измеряющие сигнал с арифметическим шагом дискретизации, также не лишены недостатков. Так, применение некоторых процедур ЦОС, например, частотной фильтрации, эффективно увеличивающей SNR для сигналов, осложненных гармонической помехой, приводит к значительным искажениям АЧХ обрабатываемого сигнала, в том числе и его полезной информативной составляющей, что может в значительной степени повлиять на результаты инверсии.

Известно несколько способов, позволяющих компенсировать искажения, вносимые в регистрируемый сигнал:

1. Учет импульсной характеристики измерительной системы путем приведения измеренного сигнала к теоретической форме (например, исключение собственного отклика системы из наблюдаемого сигнала с помощью деконволюции [2]).
2. Приведение теоретического сигнала к форме практического (например,

приведение АЧХ отклика прямой задачи к АЧХ измерительной системы в ходе инверсии[3]).

Применение любого из упомянутых способов компенсации искажений для измерительных систем, выдающих на выходе с измерителя «готовую» кривую, не представляет особой сложности ввиду постоянства аппаратных характеристик таких систем (таких как настройки аппаратного интегрирования, аналоговые фильтры и т.п.). Даже если такие системы обеспечивают возможность подключения дополнительных фильтров (например, фильтр «сетевой» помехи 50 Гц) – возможное число аппаратных конфигураций невелико и конечная импульсная характеристика системы может быть оценена отдельно и учтена для каждой из конфигураций.

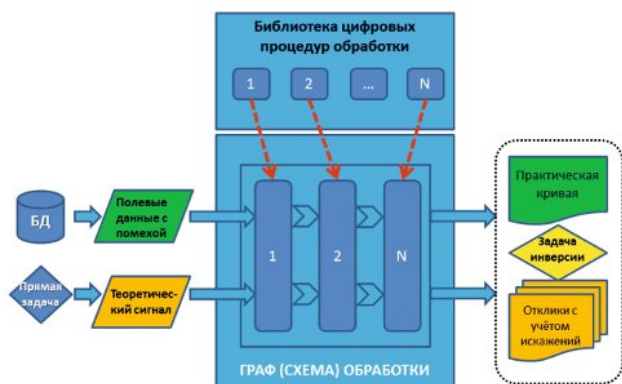
Более современные программно-измерительные системы, работающие с «открытым» каналом и выдающие сигналы без предварительной фильтрации с арифметическим шагом дискретизации, находятся в принципиально другой ситуации. Исходя из свойства линейности измерительных систем [4], суммарная импульсная характеристика такой системы будет состоять из совокупности импульсной характеристики собственно аппаратного измерительного тракта и импульсных характеристик фильтров / алгоритмов ЦОС, которые применяются при обработке итоговой кривой. Ввиду того, что число возможных процедур ЦОС велико, а настройки частотной фильтрации могут меняться в зависимости от конкретной помеховой обстановки, становится понятно, что суммарная импульсная характеристика для каждой конкретной обработанной кривой может быть совершенно разной. Это не позволяет учесть ее простым способом, так как невозможно заранее предусмотреть все

возможные варианты сочетания процедур ЦОС и их настроек.

В этой связи перспективным представляется дальнейшее развитие способа учета искажений, подразумевающего приведение теоретического отклика к форме практической кривой. В рамках развиваемого способа, который можно назвать интегрированным подходом к обработке и инверсии данных ЗСБ, для обеспечения высокого качества кривых решаются задачи цифровой обработки при автоматическом «зеркальном» учете их искажающего влияния на этапе инверсии, что в итоге должно привести к улучшению достоверности интерпретации получаемых данных.

Интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ.

Итак, интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ – это подход, основанный на применении единого в рамках отдельного физического наблюдения способа цифровой обработки измеренных и теоретических (модельных) сигналов. В графическом виде интегрированный подход представлен на рисунке 1. Так как в рассматриваемом подходе подразумевается широкое применение различных процедур ЦОС (цифровых фильтров), имеет смысл определить, что именно подразумевается



▲ Рис. 1. Интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ.

под фильтрацией в контексте данной статьи. Фильтрацией называется процесс преобразования сигналов, а устройство (либо процедура цифровой обработки), выполняющая фильтрацию, называется фильтром [5].

Главной идеей, лежащей в основе интегрированного подхода, является автоматический учет в ходе инверсии тех искажений, которые вносятся цифровыми фильтрами на этапе обработки сигналов. Возможности минимизации помех в этом случае будут выше за счет применения более широкого набора процедур, в том числе и искажающих АЧХ полезного сигнала, но при этом увеличивающих SNR до требуемого уровня. Для компенсации внесенных искажений и улучшения степени достоверности результата инверсии к рассчитываемому отклику прямой задачи в рамках интегрированного подхода автоматически должен применяться тот же «граф обработки», что был использован для получения практической кривой. Таким образом, в ходе инверсии будут сравниваться практическая и теоретическая кривые, обработанные одинаковым способом, т.е. переведенные в «еди-

ную систему отсчета», а сам граф обработки будет формироваться в каждом конкретном случае, исходя из необходимости и целесообразности применения тех или иных процедур.

Основные задачи и алгоритмы их решения в рамках интегрированного подхода приведены в схеме, показанной на рисунке 2. Их эффективное решение позволит в полной мере реализовать потенциал современных цифровых измерительных систем.

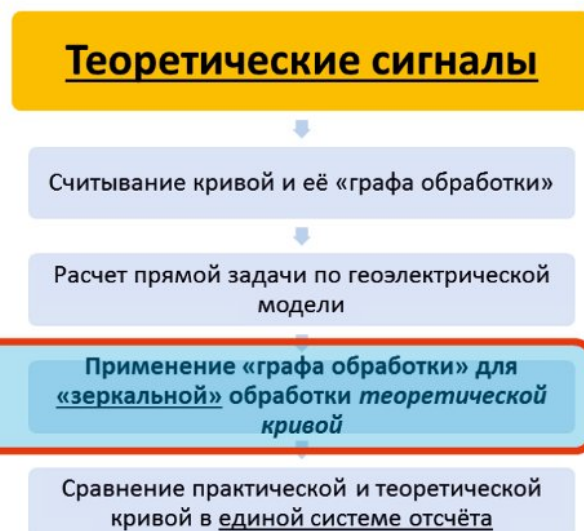
Ввиду большого многообразия процедур ЦОС необходимо произвести их классификацию по степени влияния на сигнал:

- Процедуры, выделяющие сигнал на фоне внешних помех и не искажающие его АЧХ. Примерами таких процедур могут служить «накопление» сигнала методами среднего арифметического, статистическое и робастное суммирование и т.п.
- Процедуры, выполняющие преобразование во временной или частотной области, изменяющие АЧХ полезного сигнала, т.е. вносящие искажения в спектр информативной составляющей сигнала.

Задача 1 – улучшение соотношения сигнал / шум:



Задача 2 – учёт искажений АЧХ при инверсии кривой:



▲ Рис. 2. Основные шаги решения задач интегрированного подхода.

Примерами таких процедур могут служить частотная фильтрация, свертка, интерполяция и др.

В рамках интегрированного подхода к обработке и инверсии подлежат учету процедуры, искажающие АЧХ полезного сигнала.

Реализация интегрированного подхода к обработке и инверсии данных в программно-измерительном комплексе FASTSNAP.

Для реализации интегрированного подхода к обработке и инверсии программно-измерительная система должна соответствовать следующим основным требованиям:

- 1) Исходные данные (измеренные и теоретические отклики) должны быть представлены в виде дискретных временных рядов с арифметическим шагом дискретизации сигнала по времени.
- 2) Необходима разделяемая программная библиотека процедур ЦОС с определенным способом уникальной идентификации и вызова каждой процедуры из разного программного обеспечения.
- 3) Программное обеспечение для обработки исходных данных должно позволять формировать, применять и сохранять параметры «графа обработки» вместе с результирующей кривой.
- 4) Программное обеспечение моделирования/инверсии должно автоматически считывать кривую и ее «граф обработки» и применять его при расчёте отклика прямой задачи.

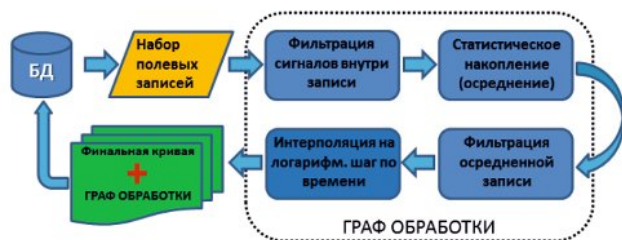
Интегрированный подход в указанном виде реализован в интегрированной системе для обработки и инверсии данных ЗСБ, входящей в состав программно-измерительного комплекса малоглубинной электроразведочной станции FastSnap [6]. Основными программными

компонентами, входящими в состав системы, являются:

- клиент-серверная база данных зондирований [7];
- программа обработки данных ЗСБ TEM-Processing;
- программа моделирования и инверсии данных ЗСБ Model 3; [8].

Вопросы классификации операций ЦОС над исходными данными и разработка расширяемой библиотеки фильтров более подробно рассмотрены в работе [9]. Отметим, что расширяемая библиотека фильтров реализована на основе технологии COM (Component Object Model). Каждый фильтр, выполненный как динамически подключаемая библиотека (DLL) и реализованный в виде COM-сервера, при регистрации в операционной системе становится доступным любому приложению, которое может запросить подключение к нему по глобальному уникальному идентификатору (GUID).

Обработка исходных данных в соответствии с требованиями интегрированного подхода производится в программе TEM-Processing. Конвейер обработки в виде схемы представлен на рисунке 3.



▲ Рис. 3. Конвейер обработки данных в программе TEM-Processing.

В зависимости от типа помехи, присутствующей в обрабатываемом сигнале, в граф обработки могут быть добавлены процедуры, подлежащие учету при инверсии. Например, при обработке малоглубинных данных для «ранних» времен кривой становления может применяться НЧ фильтрация, позволяю-

щая минимизировать помеху в виде «звона» генераторной и приемной петель [10]. Другим примером может служить обработка сигналов, осложненных «сетевой» гармонической помехой 50 Гц, полученных вблизи урбанизированных районов (НЧ, режекторная фильтрация). В отдельных случаях переходные процессы, регистрируемые с высокой частотой дискретизации (до 40 МГц) при малоуглубинных исследованиях, могут быть искажены амплитудно-модулированной помехой от радиостанций, которая также не может быть эффективно удалена регулярными процедурами накопления сигнала.

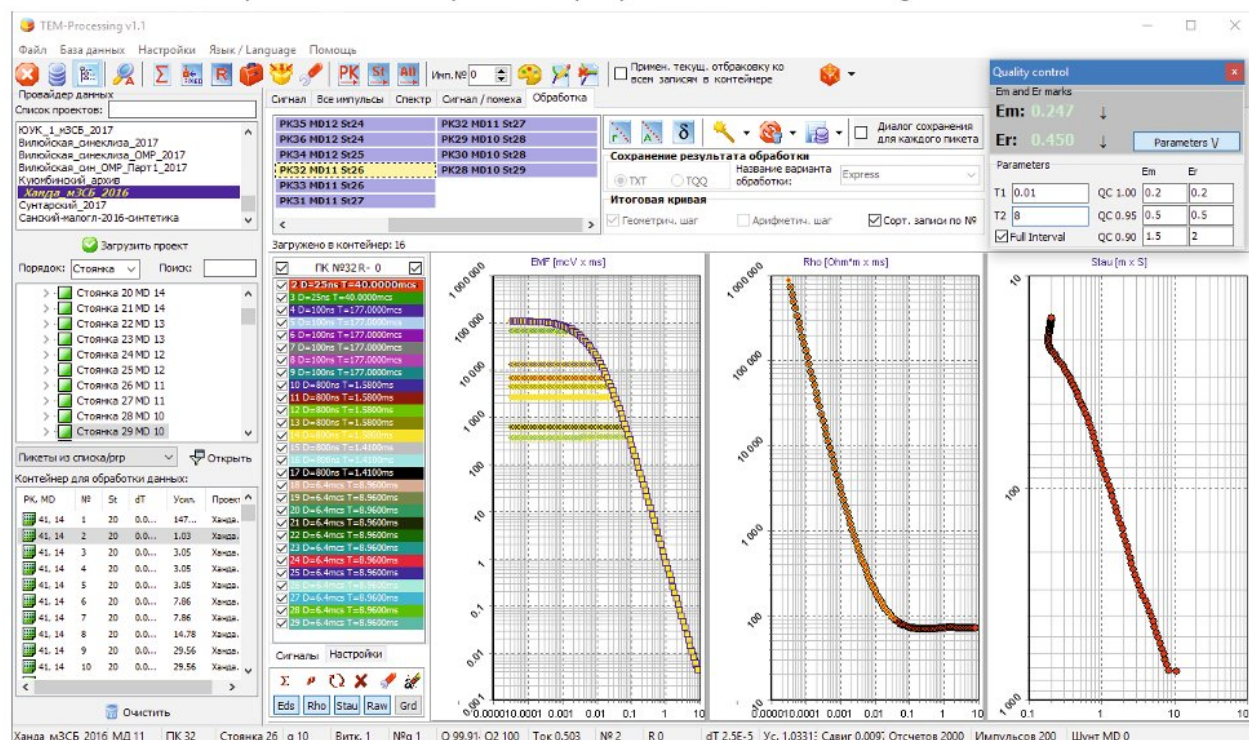
На разных стадиях конвейера обработки могут применяться различные процедуры обработки и фильтрации данных. Так, набор сигналов в виде серии временных рядов, входящих в состав записи, может быть отфильтрован перед процедурой осреднения, а результат осреднения, в свою очередь, может быть обработан с помощью фильтра с другими настройками. Заключительным шагом,

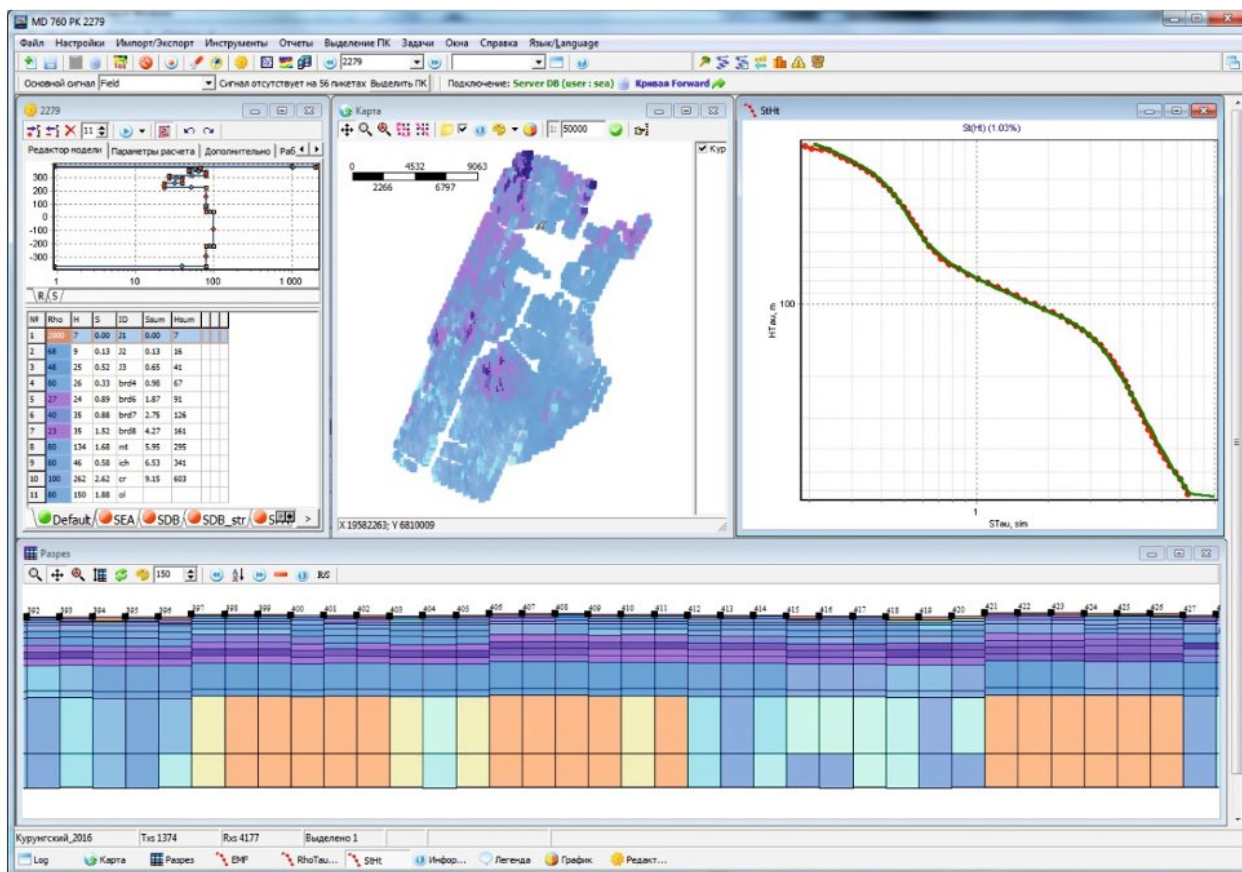
предваряющим «сборку» итоговой кривой из набора отдельных записей, является переход с помощью процедур интерполяции от линейного шага дискретизации сигнала к логарифмическому шагу (сетка времен «ЦИКЛ» или заданная пользователем). Этапы фильтрации не являются обязательными и применяются только при необходимости минимизации помех определенных типов.

Фактический граф обработки, применяемый для обработки текущего физического наблюдения, сохраняется в единую базу данных (БД) зондирований в файле с результирующей кривой (TQQ-файл). Файл формата TQQ представляет собой XML-файл, в котором специальный раздел отведен для хранения примененного графа обработки.

Помимо работы с графом обработки, программа TEM-Processing обладает широкими возможностями визуализации сигналов и исследования их характеристик (построение спектра, диаграмм SNR для разных способов обработки, расчет статистических параметров качес-

▼ Рис. 4. Блок сборки итоговой кривой в программе TEM-Processing.





▲ Рис. 5. Программа Model 3 для моделирования и инверсии данных ЗСБ.

тва и др.). Программа предоставляет возможности работы с данными как в «ручном» режиме (с каждой отдельной записью), так и в «пакетном» режиме, когда настройки фильтрации, осреднение и получение итоговых кривых могут производиться автоматически для всех загруженных в контейнер данных (обрабатываются десятки и сотни физических наблюдений). Блок итоговой «сборки» кривой (рисунок 4) позволяет производить отбраковку выделяющихся отсчетов на основе различных статистических алгоритмов, выполнять расчет трансформант сигнала и рассчитывать суммарную оценку качества кривой по параметрам EMQS [11].

Инверсия данных с учетом примененных при обработке фильтров выполняется в программе Model 3 (рисунок 5). Для этого при решении обратной задачи теоретический отклик рассчитывается с

требуемым (в зависимости от исходных данных) арифметическим шагом по времени и к нему применяется один или несколько цифровых фильтров, использованных для обработки моделируемой практической кривой, за счет чего обеспечивается учет искажений, вносимых фильтрами. Кроме того, программа обладает развитыми средствами визуализации сигналов и геоэлектрических моделей в профильном и площадном вариантах, а также позволяет выполнять расчет прямой задачи с учетом параметров индукционно-вызванной поляризации.

Применение программ обработки и инверсии в совокупности позволяет реализовать интегрированный подход, обеспечить высокое качество кривых и улучшить достоверность интерпретации за счет учета искажений, вносимых процедурами цифровой обработки.

Оценка эффективности применения интегрированного подхода к обработке и инверсии данных ЗСБ.

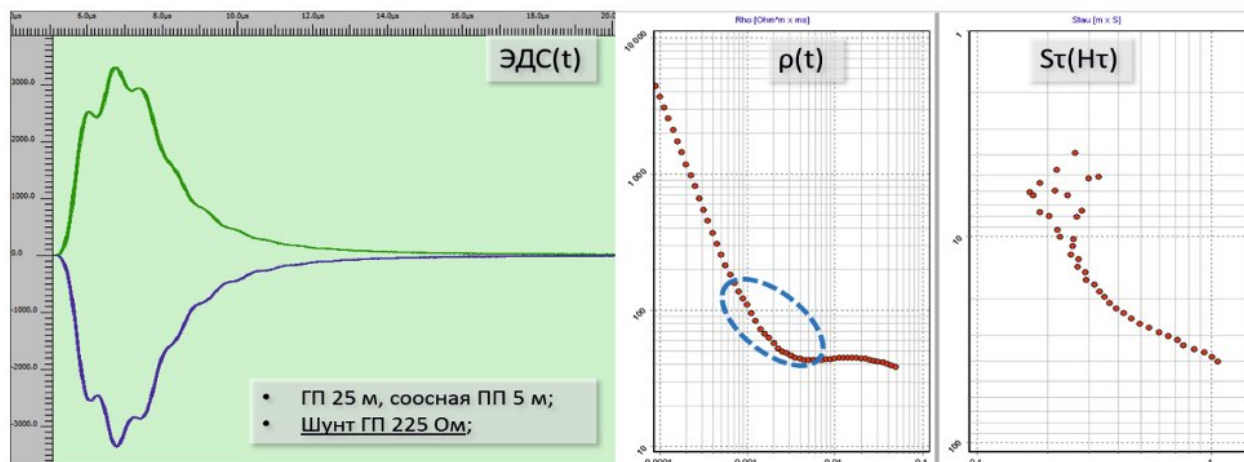
Для оценки актуальности и эффективности интегрированного подхода к обработке и инверсии данных ЗСБ рассмотрим несколько примеров решения задач, обозначенных ранее.

Задача 1 – улучшение соотношения сигнал/шум для измеренных сигналов. Рассмотрим сигнал становления, полученный соосной установкой при выполнении малоглубинного зондирования с генераторной петлей 25×25 м и приемной петлей 5×5 м (рисунок 6).

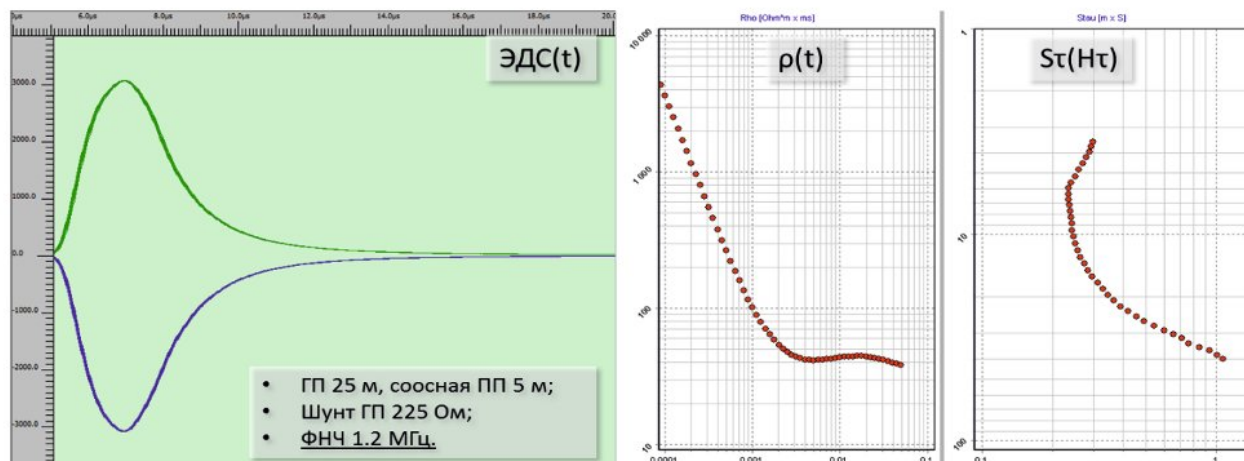
Для подавления «звона» генераторной петли (ГП) использовался параллельный шунт номиналом 225 Ом. Основной колебательный процесс («звон» ГП)

подавлен шунтом, однако в сигнале наблюдается остаточный высокочастотный колебательный процесс с частотой 1.2 МГц («звон» приемной петли, кондукторов и т.п.) с видимой длительностью около 5–6 мкс. Кривая кажущегося сопротивления (ρ) имеет видимую дисперсию (нарушение гладкости) в интервале времени 0.5 – 5 мкс. Этому диапазону времен на кривой кажущейся проводимости от кажущейся глубины $St(Ht)$ соответствует интервал разреза до глубины 10–15 м, на котором соотношение сигнал/шум не позволяет произвести качественную интерпретацию материала.

Для сравнения, на рисунке 7 приведен тот же сигнал, но обработанный фильтром нижних частот с частотой среза 1.2 МГц.



▲ Рис. 6. Сигнал становления, полученный при шунтировании ГП.



▲ Рис. 7. Сигнал становления после обработки с помощью фильтра нижних частот.

Помеха в виде колебательного процесса исключена из сигнала, кривая (t) не имеет видимой дисперсии, а кривая $St(Ht)$ содержит интерпретируемую информацию о разрезе, начиная с 5–6 м, что наглядно демонстрирует эффективность и целесообразность применения цифровой фильтрации с целью улучшения SNR на ранних временах. В приведенном примере такая обработка позволила увеличить интервал изучаемых глубин за счет уменьшения стартовой глубины зондирования. Стоит отметить гибкость и универсальность данного подхода к обработке данных, так как параметры фильтрации подбираются автоматически, исходя из параметров помехи, присутствующей в сигнале, а настройки обработки сохраняются вместе с кривой, позволяя учесть внесенные фильтрацией искажения на этапе инверсии.

Задача 2 – учет искажений АЧХ сигнала при инверсии данных ЗСБ. Для оценки степени влияния цифровой фильтрации на погрешность восстановления геоэлектрической модели при инверсии данных

ЗСБ проведем эксперимент, основанный на математическом моделировании.

План эксперимента:

1) Формирование моделей 1 и 2 с разным строением и суммарной проводимостью верхней части разреза (ВЧР).

2) Расчет теоретических откликов (ЭДС_1 и ЭДС_2) от соответствующих моделей.

3) Моделирование ситуации с обработкой сигнала фильтром для подавления «звона» ГП и ПП – применение НЧ фильтра к теоретическим откликам ЭДС_1 и ЭДС_2 для фильтрации сигналов на ранних временах (получение искаженных НЧ фильтром откликов ЭДС_1' и ЭДС_2').

4) Инверсия для Случая 1 – автоматическая инверсия искаженных откликов ЭДС_1' и ЭДС_2' с помощью «обычной» прямой задачи (без учета примененного НЧ фильтра).

5) Инверсия для Случая 2 – автоматическая инверсия искаженных откликов ЭДС_1' и ЭДС_2' с помощью модифицированной прямой задачи (с учетом реальных параметров НЧ фильтра).

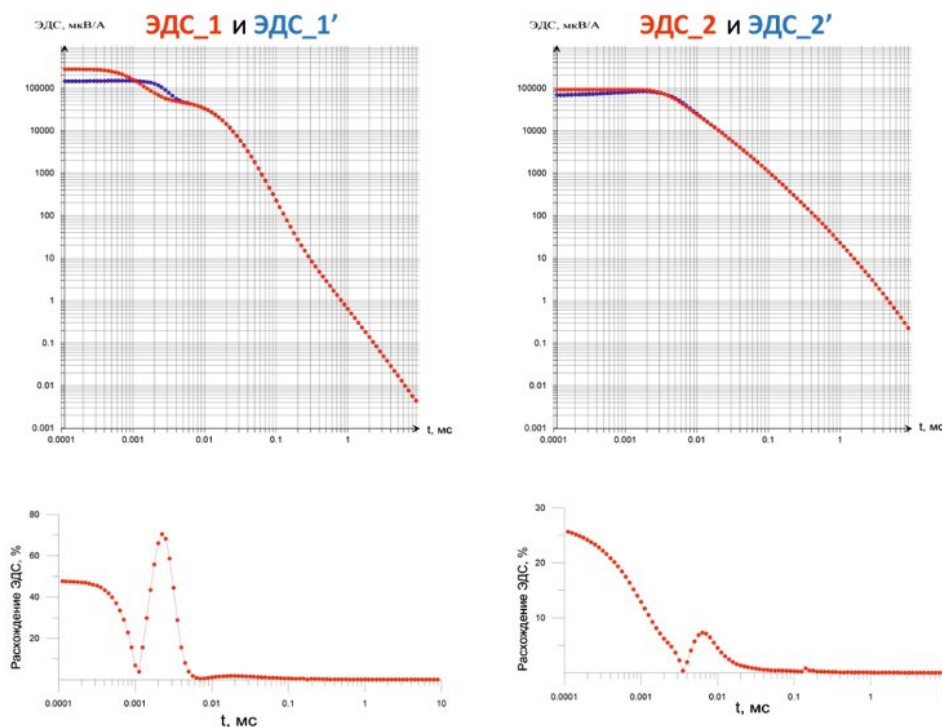


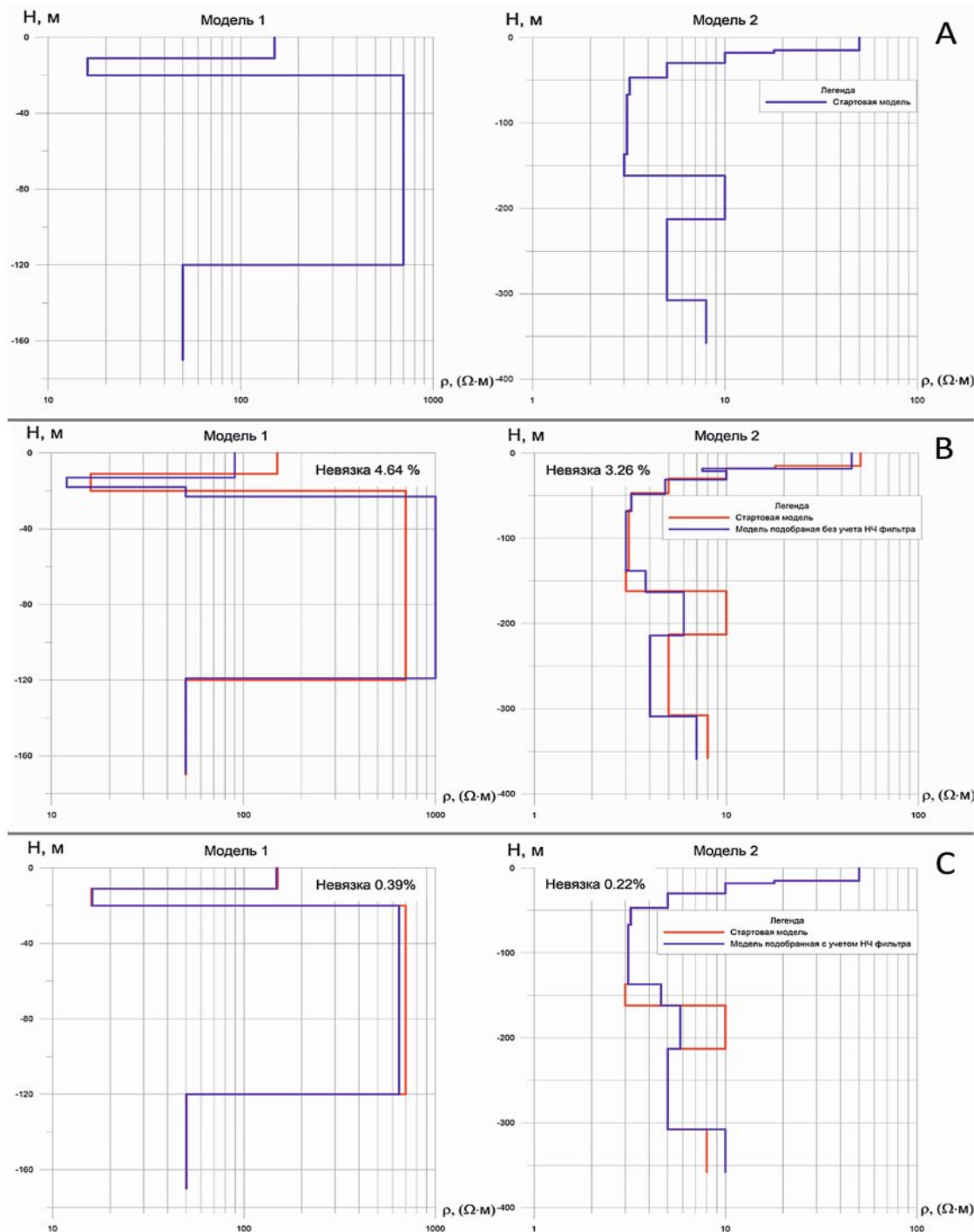
Рис. 8. Теоретические и искаженные НЧ фильтром отклики для моделей 1 и 2 (верхние графики) и графики их относительного расхождения (нижние графики).

6) Сравнение восстановленных моделей для Случая 1 и 2 с исходными моделями.

Стартовые геоэлектрические модели приведены на рисунке 9А. Теоретические отклики ЭДС_1 и ЭДС_2, а также искаженные НЧ фильтрами (с частотой среза 1 МГц и 200 кГц) отклики ЭДС_1' и ЭДС_2' приве-

дены на рисунке 8. Под откликами приведены графики относительного расхождения между исходным и искаженным НЧ фильтрами сигналами, которые демонстрируют значительные расхождения по амплитуде на интервале времени от нуля до нескольких десятков микросекунд.

На рисунке 9В показаны результаты



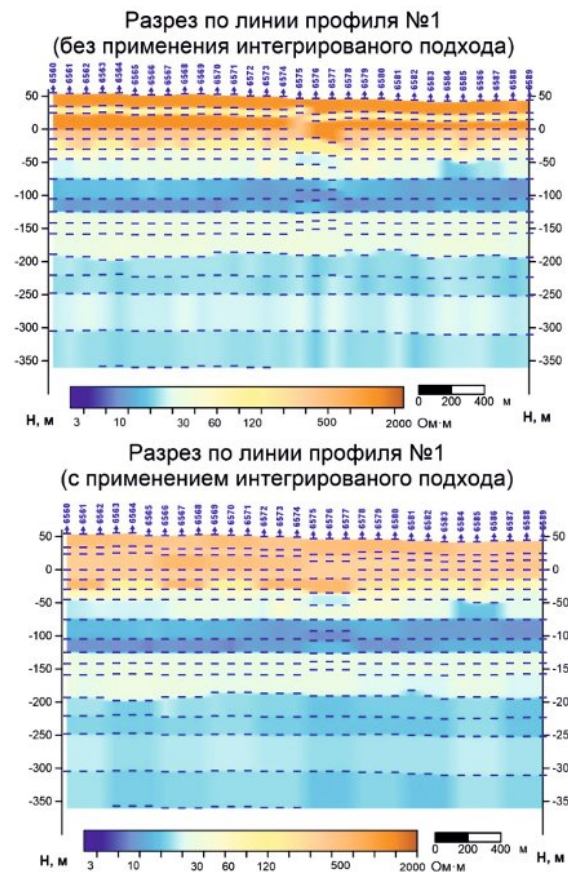
▲ Рис. 9. Стартовые геоэлектрические модели (А), результат инверсии для случая 1 (В) и случая 2 (С).

восстановления геоэлектрических моделей для Случая 1, когда искаженные отклики ЭДС_1' и ЭДС_2' инвертировались «обычной» прямой задачей без учета примененной НЧ фильтрации. Обе модели были восстановлены с заметными погрешностями, как по сопротивлению (в верхней части появился проводящий слой, которого нет в исходных моделях), так и по мощности слоев. В целом невязка подбора составила 4.6% для высокоомного разреза и 3.2% для более проводящего. С учетом того, что отклики ЭДС_1' и ЭДС_2' не зашумлялись, качество инверсии можно признать низким, а отличия между исходными и восстановленными моделями являются следствием влияния НЧ фильтрации.

Другие результаты получились при инверсии откликов ЭДС_1' и ЭДС_2' с помощью модифицированной прямой задачи, результаты работы которой дополнительно обрабатывались НЧ фильтрами с заданными параметрами (рисунок 9С).

Обе модели в верхней части разреза были полностью восстановлены, включая значения сопротивлений и мощностей. Полученные невязки (0.4% и 0.2%) свидетельствуют о более высоком качестве подбора, а полученные расхождения, вероятно, могут быть объяснены эквивалентностью распределения сопротивлений между слоями (в пределах полученной невязки).

Сравнение результатов инверсии для Случаев 1 и 2 наглядно показывает, что учет при инверсии искажений, вызванных процедурами обработки сигналов, позволяет восстановить геоэлектрические модели с меньшей погрешностью, и, таким образом, повысить достоверность интерпретации кривых.



▲ Рис. 10. Геоэлектрические разрезы по профилю №1 на участке с распространением зоны многолетнемерзлых пород, полученные в результате разных подходов к инверсии данных малоуглубинных ЗСБ (размер генераторной петли 100 × 100 м, приемной петли 10 × 10 м).

Пример практического применения интегрированного подхода для обработки и инверсии данных ЗСБ.

С целью проверки работоспособности подхода была произведена инверсия реальных данных. На рисунке 10 показаны два геоэлектрических разреза, полученные из одного и того же набора данных (36 физических наблюдений), но с применением разных подходов к инверсии. Данные были записаны на одном из участков Западной Сибири. Известно, что верхняя часть разреза (100–130 м) сложена многолетнемерзлыми породами (ММП) с высокой льдистостью. Сопротивление ММП по данным БКЗ составляет

порядка 500 Ом·м.

На разрезе, полученном без учета интегрированного подхода (верхний разрез на рисунке 10), имеется проводящий слой с сопротивлением 60–70 Ом·м, хотя присутствие данного слоя противоречит априорной геологической информации. По всей вероятности, данный проводящий слой является следствием искажений, вносимых процедурами обработки исходных данных, и появляется в каждой геоэлектрической модели разреза, так как позволяет добиться меньшей невязки подбора.

Разрез, показанный на рисунке 10 внизу, получен с применением интегрированного подхода (с помощью прямой задачи, учитывающей фактический граф обработки каждой кривой). Верхняя часть разреза включает слой многолетнемерзлых пород мощностью более 100 м, обладающих высоким удельным электрическим сопротивлением, что соответствует физико-геологической модели (ФГМ) участка работ. Более качественный подбор верхней части разреза также позволил улучшить и результаты восстановления более глубоких слоев и в целом обеспечить меньшую невязку подбора моделей.

Таким образом, в результате применения интегрированного подхода были получены результаты инверсии, соответствующие ФГМ исследуемого участка, а также на 1.5–2% улучшилась общая невязка подбора геоэлектрических моделей.

Заключение.

Современные цифровые измерительные системы, работающие с арифметическим шагом регистрации, обладают несомненными преимуществами с точки зрения обеспечения качества измерений благодаря широкому набору средств ЦОС.

Однако, применение некоторых алгоритмов обработки может приводить к искажениям АЧХ информативной части сигналов, сказывающимся на достоверности их интерпретации. Вследствие этого необходимы дополнительные меры, тем или иным способом обеспечивающие компенсацию вносимых при обработке искажений.

Добиться этого можно с помощью рассмотренного в данной статье интегрированного подхода к обработке и инверсии, позволяющего применять полный арсенал средств ЦОС и вместе с тем обеспечивающего автоматический учет искажений, вносимых при обработке сигналов. За счет применения данного подхода расширяются возможности измерительной системы при работе в сложных помеховых условиях (возрастает помехозащищенность, обеспечивается возможность работы в урбанизированных и промышленных районах с высоким уровнем эл.м. помех). Учет искажений, реализованный в интегрированном подходе, позволяет улучшить достоверность и качество инверсии получаемых данных, а в некоторых случаях и расширить диапазон изучаемых глубин, например, уменьшить стартовую глубину зондирования за счет подавления помехи в виде «звона» петли.

Благодарности.

Автор благодарен д.г.-м.н., профессору Н.О. Кожевникову за обсуждение идей и результатов данной работы, а также И.А. Шелохову за помощь в подготовке материалов статьи.

Литература

1. K.-M. Strack, T.H. Hanstein and H.N. Eilenz, LOTEM data processing for areas with high cultural noise levels // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989, vol.53 P.261—269

2. K.-M. Strack, Chapter 3. Distortions of the Signal and their Compensation // Exploration with deep transient electromagnetic: Elsevier, 1992, reprinted 1992.

3. Effersø F., Auken E., and Sørensen K., Inversion of band-limited TEM responses // Geophysical Prospecting, 1999, vol.47, P. 551 – 564

4. Стивен Смит, Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников: М.: Додэка-XXI, 2012.

5. Гольденберг Л. М. и др. Цифровая обработка сигналов. Справочник. // М.: «Радио и связь», 1985. — 312 с.

6. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap // ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ, 2010, №1, С.27 – 31.

7. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Шарлов М.В. Интеграция оперативной системы обработки и хранилища данных электромагнитных зондирований – Вестник ИрГТУ, 2014. - № 4(87). - С. 18-23.

8. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В., Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ, 2006, №1, С.33 – 36.

9. Шарлов М.В., Гусейнов Р.Г. Система "EM-Processing" для многоэтапной обработки данных ЭМЗ на основе подключаемых цифровых фильтров // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 2.- СПб.: СПбГУ, 2011 – с.134-137;

10. Шарлов М.В. Интегрированный подход к обработке и инверсии данных малоглубинных ЗСБ – оценка эффективности по результатам математического моделирования // Расширенные тезисы 13-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика 2017»;

11. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований – Вестник ИрГТУ, 2015. - № 5(100). - С. 53-60.

Подробнее об авторе



Шарлов
Максим Валерьевич

первый заместитель
генерального директора
АО «Иркутское электрораз-
ведочное предприятие»