

Особенности обработки геофизических сигналов в семействе измерителей МЭРИ Смарт

■ Епишкин Д.В., Яковлев Д.В., НТЦ «Северо-Запад», г. Москва
 ■ Яковлев А.Г., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Введение

МЭРИ Смарт – это новое поколение многофункциональных электроразведочных измерителей, выпускаемых компанией «Северо-Запад». Данные измерители сочетают в себе малые габариты и традиционную для измерителей МЭРИ многофункциональность. Особенностью нового поколения измерителей является то, что они осуществляют только оцифровку сигнала и его передачу на Android-устройство по Wi-Fi, где происходит вся дальнейшая обработка. Такой подход позволяет поднять удобство работы с прибором и функциональность на новый уровень и легко создавать развитые, адаптивные алгоритмы обработки, которые могут использовать возможности мощных процессоров современных смартфонов и планшетов.

Область применения измерителей МЭРИ Смарт включает инженерные, экологические, поисковые и разведочные исследования. Они предназначены для проведения электроразведочных работ следующими методами:

1) **Электрические зондирования**, такие как классические вертикальные электрические зондирования, дипольные осевые и дипольные экваториальные зондирования (ВЭЗ, ДОЗ и ДЭЗ), зондирования трёхэлектродными установками AMN и MNB, измерения вызванной поляризации (ВП) в частотной области в режиме ИНФАЗ-ВП и во временной области.

2) **Частотные зондирования (ЧЗ)** с измерением амплитуды и дифференциального фазового параметра электрических и магнитных компонент поля.

3) **Электропрофилирование**, в том

числе с измерением ВП в частотной или временной области, с установкой среднего градиента (ВП-СГ) и другими установками.

4) **Естественные поля**: метод ЕП с потенциал и градиент установкой, измерение блуждающих токов (БТ), измерения на промышленных частотах, поиск подземных коммуникаций (ММППК).

Каждый электроразведочный метод имеет свою специфику и требует особых подходов к обработке – в некоторых случаях требуется быстрое получение результата, в других необходимо выполнять длительные наблюдения.

В статье приведены характеристики измерителя МЭРИ Смарт, особенности его работы, обсуждаются достоинства и недостатки беспроводного управления, описаны применяемые алгоритмы обработки.

Семейство измерителей МЭРИ Смарт

МЭРИ Смарт – это аппаратно-программный комплекс, состоящий из

одноканального или двухканального электроразведочного измерителя с 24-битным АЦП, низкими собственными шумами (<1 мкВ), управляемого с помощью смартфона или планшета с операционной системой Android 7.0 и выше (рис. 1). Обработка сигналов выполняется на Android устройстве в реальном времени с помощью управляющей программы МЭРИ Смарт. Кроме обработки сигналов управляющая программа позволяет строить графики профилирования, кривые зондирования, разрезы и карты непосредственно в поле прямо во время измерений, а также отправлять результаты через интернет.



▲ Рис. 1. Измеритель МЭРИ Смарт.

В таблице 1 приводятся основные технические характеристики приборов МЭРИ Смарт.

Добавление второго канала в МЭРИ Смарт 2 позволяет поднять производительность при проведении профилирования, измерении ВЭЗ с воротами, а также позволяет эффективнее проводить векторные измерения, измерения методами БТ и МППК.

Предлагаемая система (регистратор с Wi-Fi модулем + смартфон) имеет свои

▼ Табл. 1. Технические характеристики приборов МЭРИ Смарт.

Параметр	МЭРИ Смарт	МЭРИ Смарт 2
Количество каналов	1	2
Частоты дискретизации, кГц	1, 2.5, 5, 10	
АЦП	24 бит	
Тип входного сигнала	Методы сопротивлений и ЧЗ: меандр Метод ВП: меандр, меандр с паузой Методы ЕП и БТ: естественное поле Метод пром. частот: синус 50, 60 Гц	
Рабочие частоты	От 0 до 2500 Гц	
Коэффициенты усиления	x1, x9	x0.1, x1, x10
Диапазон входного напряжения	x1: ± 3 В x9: ± 0.38 В	x0.1: ± 10 В x1: ± 1 В x10: ± 0.1 В
Компенсация ПС	В пределах диапазона вх. напряжения	
Собственные шумы, RMS	< 1 мкВ	
Входное сопротивление	> 20 Мом	
Потребляемая мощность, макс.	>0.9 Вт	>1.5 Вт
Источник питания; время непрерывной работы	Li-ion аккумулятор 3.4 А·ч; 10 часов	Li-ion аккумулятор 10 А·ч; 18 часов
Интерфейс передачи данных	Wi-Fi	
Измерение R заземления	Да	
Грозовая защита	Да	
Диапазон температур	-20 ... +50 °C	
Габариты	135x110x35 мм	
Масса	0.45 кг	0.55 кг
Класс защиты корпуса	IP54	

достоинства и недостатки. К недостаткам относятся: 1) необходимость дополнительно к измерителю иметь защищенный смартфон и следить за уровнем его заряда в течение работ; 2) неудобство работы со смартфоном при сильном морозе и во время дождя. К достоинствам можно отнести: 1) простота разработки программного обеспечения прибора и возможность создавать продвинутые системы обработки данных; 2) возможность использования всего множества графических средств, предоставляемых операционной системой Android, что позволяет эффективно взаимодействовать с прибором; 3) использование сервисных возможностей смартфона, таких как GPS привязка, удобный экспорт данных (оперативная пересылка по email, через мессенджеры), фото- и видеофиксация; 4) компактность измерителя.

Типы обрабатываемых сигналов

Основными типами обрабатываемых системой МЭРИ Смарт сигналов являются «меандр» и «меандр с паузой». Рассмотрим подробнее сигнал формы «меандр». Ток такой формы легко сгенерировать, и в то же время, являясь периодическим сигналом, он представляет собой сумму синусоидальных гармоник:

$$I(t) = \frac{4a}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

Где a – амплитуда прямоугольного импульса, ω – основная частота меандра, t – время. Разложение представляет собой сумму нечетных гармоник основной частоты меандра. Измеряемое напряжение также будет содержать только нечетные гармоники:

$$U(t) = \frac{4a}{\pi} (A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + A_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) + \dots)$$

Где A_i – амплитуда i -ой гармоники, φ_i – фаза i -ой гармоники. Амплитуда и фаза каждой гармоники заранее не определены и будут зависеть от особенностей геоэлектрического разреза. При проведении измерений нас будут интересовать эти величины.

Определенная сложность возникает при определении параметров φ_i . Для их определения требуется синхронизация измерителя с генератором. Для решения этой проблемы, а также для повышения помехозащищенности вводится дифференциальный фазовый параметр (ДФП), рассчитываемый по двум частотам ω_1 , ω_2 :

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_{\text{ВП}}(\omega_1)\omega_2 - \varphi_{\text{ВП}}(\omega_2)\omega_1}{\omega_2 - \omega_1}$$

При этом в большинстве случаев $\Delta\varphi \approx \varphi_{\text{ВП}}$ [Алексанова и др., 2018; Куликов, Шемякин, 1978].

При измерении сигнала ВП во временной области целесообразно использовать сигнал типа «меандр с паузой», чтобы проводить измерения при выключенном токе в генераторе.

1. Алгоритм обработки данных для методов ВЭЗ, ЭП.

Наиболее простой алгоритм обработки данных в МЭРИ Смарт применяется для методов постоянного тока без измерения ВП (рис. 2). В этих методах необхо-

▼ Рис. 2. Граф обработки для методов ВЭЗ и ЭП.



димо определять только амплитуду сигнала. В данном случае требуется алгоритм обработки, который будет давать надежный результат как можно быстрее, желательно уже с первого периода. Исходя из этого, используется следующий алгоритм: временной ряд анализируется в скользящем окне, шаг скользящего окна равен половине периода сигнала, ширина окна равна периоду сигнала. Для каждого окна определяется статистическое распределение отсчетов и определяется расстояние между 25% и 75% квантилями. Амплитудой сигнала считается половина этого расстояния.

Данная процедура устойчива к случайным спорадическим помехам, аппаратным шумам и индукционным помехам, однако плохо справляется с квазисинусоидальными помехами, например, промышленной помехой 50/60 Гц, поэтому необходимо предварительно применять режекторный и гребенчатый фильтры, настроенные на необходимые частоты.

В данном алгоритме обработки каждые полпериода получается новое накопление. По всем накоплениям, полученным в результате наблюдений, вычисляется робастное среднее и доверительный интервал 95%.

2. Алгоритмы обработки данных для методов ЧЗ, ВЭЗ-ВП, ЭП-ВП, СГ-ВП в частотной области (технология ИНФАЗ-ВП).

Данные методы имеют повышенные требования к обработке. Уровень сигналов зачастую слабый, и одновременно с этим требуется получение фазовых параметров, эффекты от которых составляют первые проценты от полезного сигнала. При обработке таких сигналов для получения хорошего результата необходимо учитывать всю доступную

априорную информацию, а именно:

- Сигнал периодический, имеет предсказуемый спектральный состав;
- Сигнал антисимметричный (положительный и отрицательный импульсы совпадают по форме с точностью до знака);
- Сигнал в большинстве случаев с высокой точностью можно описать аналитической функцией;
- Основные виды помех: промышленная помеха - 50 Гц, низкочастотный тренд, связанный с ЕП и электрохимическими процессами на электродах, индукционные наводки и емкостные утечки, спорадические помехи, связанные с шахтами, железными дорогами, трансформаторами и т.д. Обсуждение некоторых типов помех и методов борьбы с ними, можно найти, например, в работах [Junge, 1996; Буддо, 2009; Букингем, 1986].

Основываясь на данных предпосылках, был разработан следующий граф обработки (рис. 3).

В самом начале измерения, пока длина временного ряда недостаточна для получения результата по полному графу, используется экспресс оценка, позволяющая получать результат уже с первого периода для оценки его уровня и качества. Далее, по мере накопления данных начинает использоваться полный граф обработки.

За основу были взяты классические процедуры цифровой обработки сигналов, описанные, например, в работе [Айфичер, 2004]. Также были использованы процедуры, специфичные для электроразведочных методов, описанные в [Панкратов и др., 2010].

В дополнение к этим процедурам используется модифицированная процедура дифференциального накопления с робастной отбраковкой дискретов.

► Рис. 3.
Граф
обработки
для методов
с измерением
ВП в частотной
области.



Данная процедура основана на свойстве антисимметричности сигнала и заключается в робастном суммировании N полупериодов сигнала с чередованием знака:

$$Y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i (-1)^i X(t - i\frac{T}{2}),$$

где X – исходный сигнал, Y – фильтрованный сигнал, w_i – веса, определенные в ходе применения робастных процедур, T – период сигнала, t – время.

Также предлагается использовать процедуру аппроксимации сигнала аналитической функцией (см. далее).

Для тестирования алгоритма обработки на первом этапе использовались синтетически смоделированные сигналы с добавленными помехами разной природы.

В качестве исходного сигнала использовался меандр фиксированной частоты, амплитуды, параметров ВП. Для моделирования процесса ВП использовалась модель Cole-Cole [Cole & Cole, 1941]:

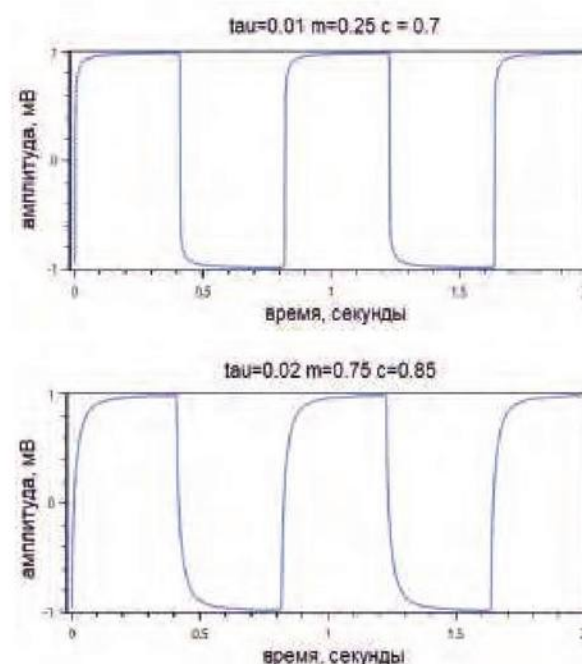
$$X(\omega) = R \left(1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right),$$

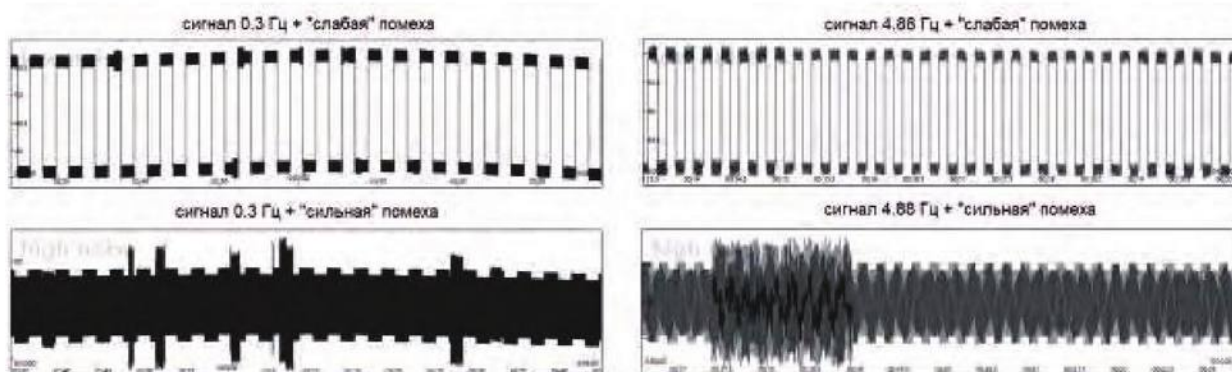
где ω – круговая частота, $X(\omega)$ – спектр сигнала ВП на частоте ω , R – амплитуда

сигнала, τ , m . Рассчитывались значения гармоник меандра в частотной области и затем осуществлялся пересчет во временную область (рис. 4).

К полезному сигналу добавлялись помехи: 50 Гц, линейный тренд, низкочастотный синусоидальный тренд, белый шум, дополнительные помехи случайной амплитуды и длительности. Примеры зашумленных сигналов показаны на рис. 5.

▼ Рис. 4. Примеры синтетических сигналов.



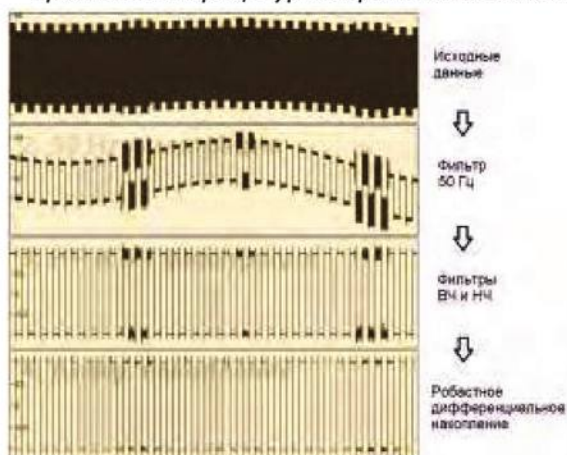


▲ Рис. 5. Примеры синтетических сигналов после зашумления.

На рис. 6 показан эффект от применения процедур во временной области. Исходные данные – синтетический меандр с ВП. На меандр наложен белый шум, сильная помеха 50 Гц, низкочастотный тренд и спорадические помехи. После применения фильтров 50 Гц, ВЧ и НЧ сигнал отчетливо виден, пропадает низкочастотный тренд. Линейные фильтры не помогают бороться со спорадическими помехами. Они по-прежнему остаются в сигнале. Далее к сигналу применяется робастное дифференциальное накопление, что делает сигнал практически свободным от помех.

На следующем этапе выполняется аппроксимация данных модельным сигналом. Данный этап требует существенных вычислений и его применение в реальном времени затруднено. Поэтому аппроксимация данных модельным

▼ Рис. 6. Преобразование временного ряда в ходе применения процедур во временной области.

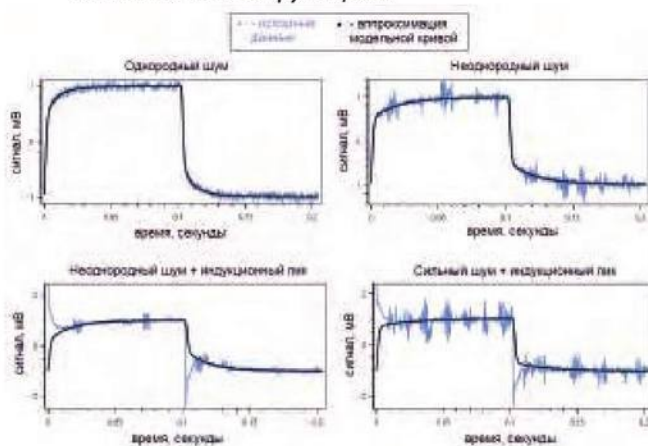


сигналом применяется только в режиме пост-обработки, когда записанный в память сигнал обрабатывается на персональном компьютере после проведения измерений.

На данном этапе каждый период данных аппроксимируется моделью. Подбор параметров модельного сигнала выполняется с помощью метода L-BFGS (модификация метода Ньютона) [Liu, 1989]. На рис. 7 показан результат аппроксимации зашумленных сигналов моделью. В случае с индукционной помехой фрагменты сигнала, следующие сразу за переключением полярности тока, игнорируются при подборе.

Тестирование процедуры аппроксимации проводилось на массиве синтетических данных: зашумленных меандров с разными параметрами ВП. Для каждого синтетического временного ряда прово-

▼ Рис. 7. Аппроксимация меандра аналитической функцией.



дилась обработка с использованием аппроксимации и без неё. Вычислялись погрешности для амплитуд и ДФП:

$$\Delta A = \frac{(A_1^{\text{обработки}} - A_1^{\text{реальное}})}{A_1^{\text{реальное}}} * 100\%;$$

$$\Delta\varphi_{13} = \Delta\varphi_{13}^{\text{обработки}} - \Delta\varphi_{13}^{\text{реальное}}$$

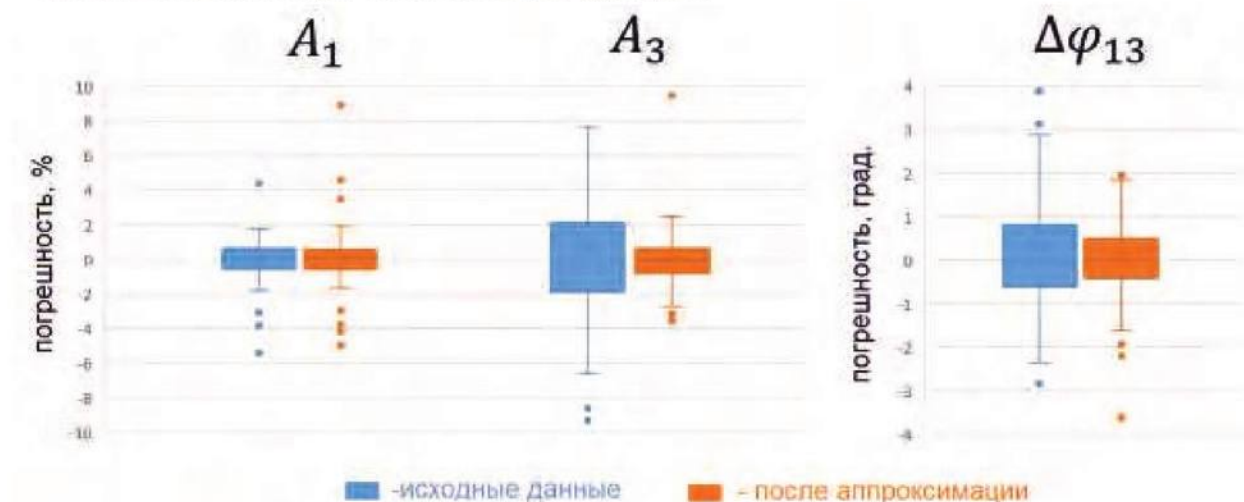
где A_1 – амплитуда первой гармоники меандра, $\Delta\varphi_{13}$ – ДФП, рассчитанный по 1-ой и 3-ей гармонике.

На рис. 8 приведено сравнение распределений погрешностей для результатов обработки исходных данных и данных после процедуры аппроксимации. Можно видеть, что в результате аппроксимации удастся увеличить точность

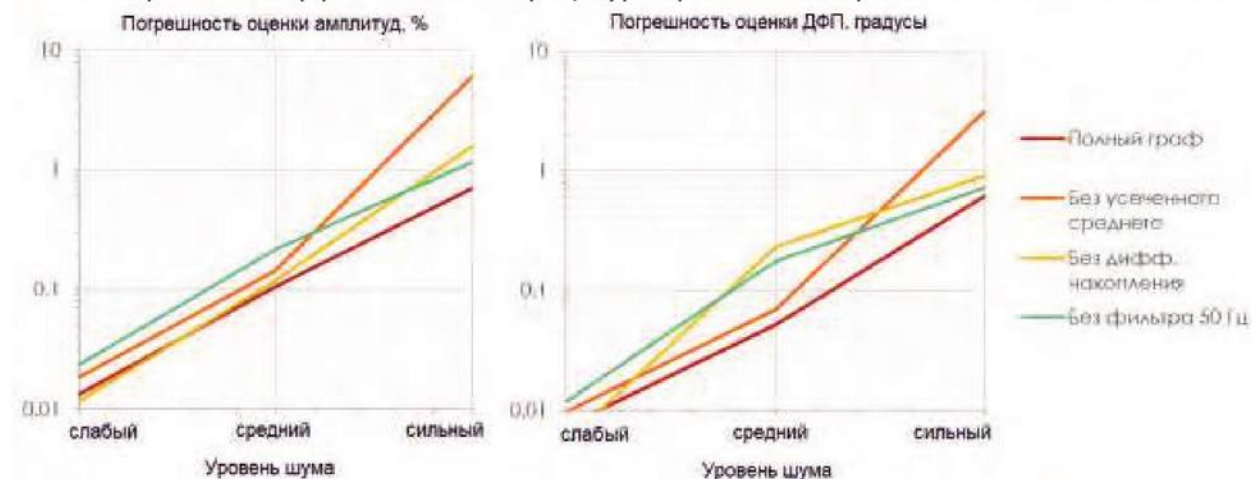
определения 3-ей гармоники меандра и фазового параметра. Точность определения 1-ой гармоники не меняется.

На последнем этапе обработки осуществляется переход в частотную область и робастное осреднение в частотной области. Вычисляются следующие параметры и их 95% доверительные интервалы: A_1, A_3, A_5 – амплитуды первой, третьей и пятой гармоник, $\Delta\varphi_{13}, \Delta\varphi_{35}$ – ДФП, рассчитанные для первой и третьей гармоник, для третьей и пятой гармоник. На рис. 9 продемонстрировано, что использование одновременно процедур во временной и частотной области дает наилучший результат.

▼ Рис. 8. Распределение погрешностей обработки массива зашумленных данных до и после аппроксимации аналитической функцией.



▼ Рис. 9. Сравнение эффективности процедур обработки во временной и частотной области.



3. Алгоритм обработки данных для методов ВЭЗ-ВП, ЭП-ВП, ВП-СГ во временной области

Авторы считают, что измерение параметров ВП в частотной области (технология ИНФАЗ-ВП) является предпочтительным, т.к. такой способ измерения параметров ВП является более помехозащищенным; однако в измерителе МЭРИ Смарт есть возможность обработки и во временной области.

Как и в случае с обработкой в частотной области в начале измерения, пока данных мало, используется упрощенный граф обработки, из которого исключены ВЧ фильтрация и дифференциальное накопление (рис. 10). Это позволяет получать результат, начиная с первого периода сигнала. Когда число накопленных достигает 7 периодов, используется полный граф обработки.

Так же, как в случае с обработкой в частотной области, на первых этапах выполняется фильтрация сигнала и робастное дифференциальное накопление. На рис. 11 показан фрагмент временного ряда до и после применения процедур во временной области.

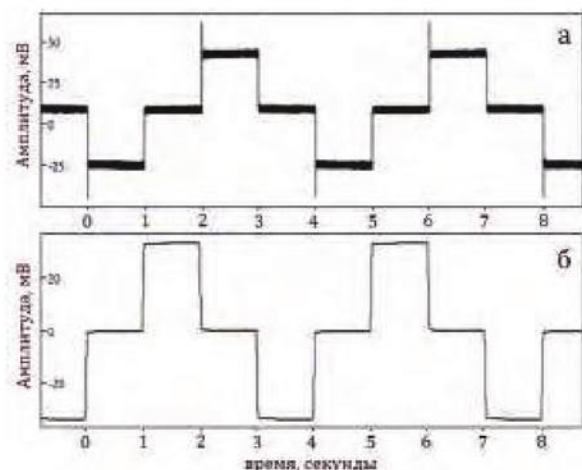
Одним из важных моментов при обработке во временной области является определение положения фронта отключения тока. Максимальная точность его определения достигается путем синхронизации сигнала на измерителе с генератором. Это требуется, например, в методе ЗСБ. В случае с измерением кривой ВП, когда характерные времена спада составляют более 10 миллисекунд, возможно определение фронта без синхронизации с генератором.

В реализованном в системе МЭРИ Смарт алгоритме фронт определяется как дискрет временного ряда, предшествующий моменту, в котором отфильтро-



▲ Рис. 10. Граф обработки для методов с измерением ВП во временной области.

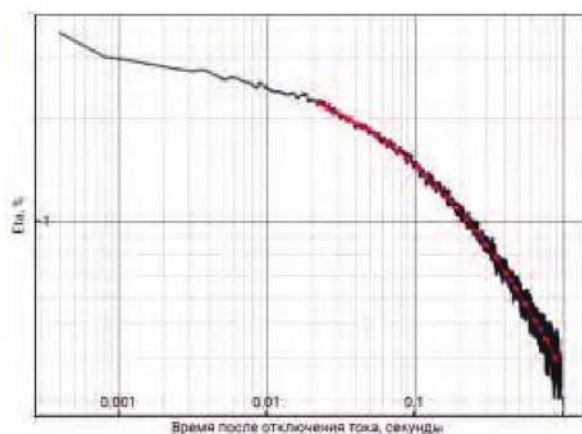
ванный просуммированный по полупериодам сигнал уменьшается до 0.5 от амплитуды меандра (рис. 12). В большинстве случаев удается достигать точности определения положения фронта менее 1



▲ Рис. 11. Фрагмент временных рядов
а) исходные данные
б) после фильтрации.



▲ Рис. 12. Пример определения фронта сигнала.



▲ Рис. 13. Кривая спада ВП.

миллисекунды, что меньше длительности фронта выключения тока большинства генераторов, используемых при проведении работ методом ВП.

Далее, с учетом определенного положения фронта, рассчитывается кривая ВП сначала на линейной сетке времен с шагом равным шагу отсчетов АЦП (черная кривая на рис. 13). Затем происходит интерполяция на более редкую итоговую сетку времен: для этого для каждого интересующего времени выполняется

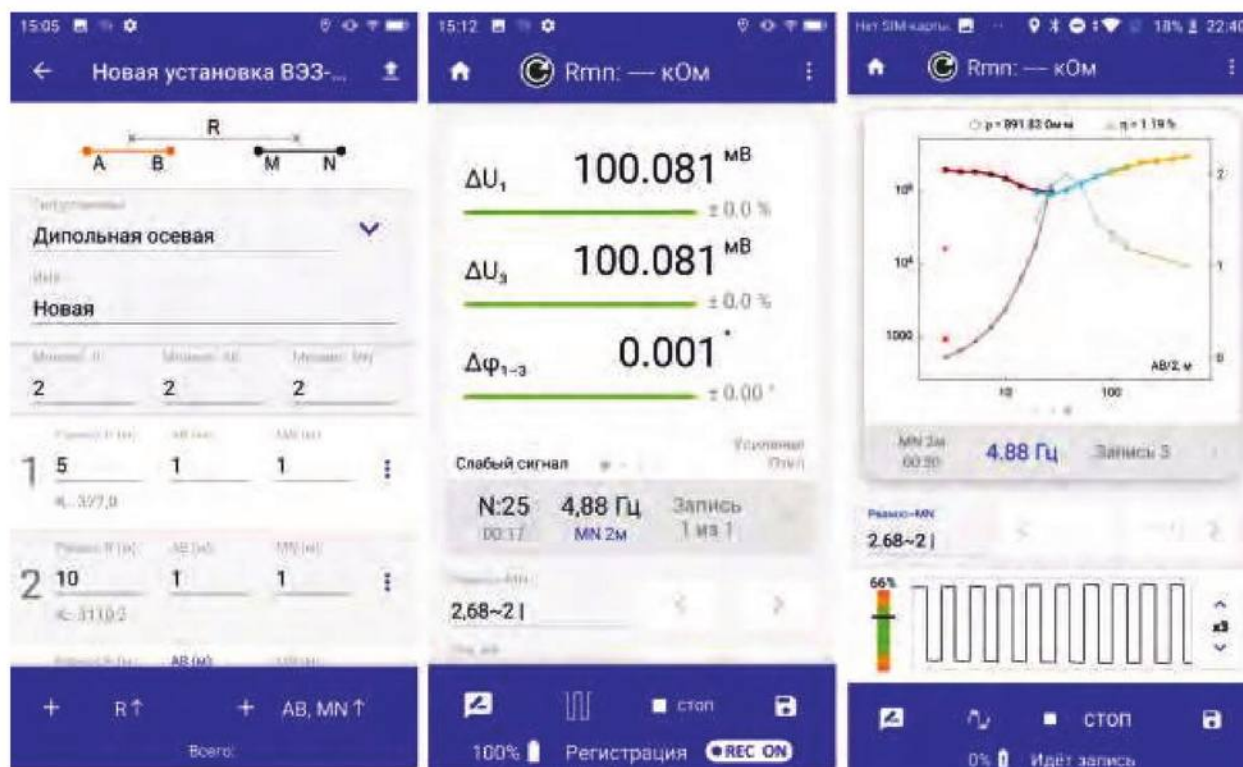
робастная линейная регрессия по набору значений в небольшом интервале вокруг точки интерполяции [Хьюбер, 1984] и затем по массиву полученных значений дополнительно выполняется сглаживающая сплайн аппроксимация [Hastie, 1990]. Результат аппроксимации показан на рис. 13 красной линией.

4. Управляющая программа для Android устройств

Управляющая программа создана только для устройств под управлением Android OS, т.к. по оценке авторов устройства на других платформах в полевых работах практически не используются. При разработке пользовательского интерфейса был сделан акцент на простоте и интуитивной понятности пользовательского интерфейса, так, чтобы пользоваться приложением можно было без изучения инструкций (рис. 14).

Для каждого электроразведочного метода был реализован свой режим

▼ Рис. 14. Графический интерфейс управляющей программы МЭРИ Смарт.



измерений со свойственными ему настройками, представлением результатов обработки и инструментами создания установок. Так, например, для метода ВЭЗ в ходе измерений можно видеть кривую зондирования, в методе ЭП отображается график профилирования, реализована автоматическая нумерация пикетов, в методе БТ в соответствии с ГОСТом сигнал регистрируется каждые 10 секунд в течение 10 минут и т.д. Также есть универсальный режим: выполнение измерений напряжения без привязки к определенной методике с возможностью проводить периодические замеры.

Один из алгоритмов обработки, описанных выше, автоматически выбирается в зависимости от выбранного пользователем метода. Несмотря на то, что обработка ведется в реальном времени, управляющая программа позволяет записывать исходный сигнал для последующей переобработки и контроля качества выполненных измерений.

В приложение имеется карта, на которой можно просмотреть как запланированные, так и уже выполненные измерения. Положение выполненных измерений определяется на основе GPS смартфона.

Заключение

Особенностью системы МЭРИ Смарт является то, что измеритель выполняет только первичную фильтрацию, оцифровку сигнала и передачу его по Wi-Fi на Android устройство для последующей обработки. Обработка происходит в реальном времени, также есть возможность сохранения исходного сигнала в файл для последующей углубленной обработки.

Необходимость использования смартфона для выполнения измерений, с одной стороны, накладывает некоторые

ограничения (разрядка смартфона, работа в мороз, дождь), с другой стороны, даёт ряд преимуществ: удобство работы, сервисные возможности смартфона, простота внедрения новых функций и алгоритмов обработки, использование продвинутых и ресурсоёмких систем обработки данных.

В алгоритмах обработки, используемых в измерителях МЭРИ Смарт, были учтены следующие требования: 1) при обработке должна использоваться априорная информация о сигнале, такая как периодичность, антисимметричность и др., а также о структуре помех; 2) обработка должна быть устойчивой к сильным неравномерным по времени шумам; 3) алгоритмы должны быть адаптивными и подходить как для быстрых измерений при высоком уровне сигнала, так и для обработки слабых, сильно зашумленных сигналов; 4) первый результат должен быть получен как можно раньше, начиная уже с первого периода, затем, по мере увеличения накоплений, обработка должна усложняться и включать в себя более эффективные процедуры, которые требуют большего числа накоплений; 5) измерительный комплекс должен иметь возможность работать как в частотном, так и во временном режиме.

Система МЭРИ Смарт продолжает развиваться и совершенствоваться. В перспективе планируется добавить возможность проведения измерений незаземлёнными линиями, зондирования многоэлектродными установками с использованием коммутатора, объединение нескольких регистраторов в один массив с управлением с помощью одного смартфона и пр. Реализация этих планов позволит расширить область применения Многофункционального ЭлектроРазведочного Измерителя МЭРИ Смарт.

Литература

1. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. М.: Вильямс, 2004. 992 с
2. Алексанова Е.Д., А.А. Бобачев, Епишкин Д.В., Зорин Н.И., Куликов В.А., Модин И.Н., Пушкарев П.Ю., Шевнин В.А., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том I, Тверь: ПолиПРЕСС, 2018 – 276 с.
3. Буддо И. В. Особенности подавления электромагнитных помех различной природы математическими алгоритмами // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2009. № 2. с. 7-10.
4. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. М.: Мир, 1986. 399 с.
5. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М: Недра, 1978. 157 с.
6. Хьюбер П. Робастность в статистике. М: Мир, 1984.
7. Cole K.S. and Cole R.H., Dispersion and absorption in dielectrics, I. Alternating current characteristics // Journal of Chemical Physics, 1941, 9, 341-351.
8. Hastie T.J. Generalized Additive Models. Chapman and Hall, 1990
9. Junge A. Characterization and correction for cultural noise // Surveys in Geophysics, 1996, 17(4): 361-391
10. Liu D.C., Nocedal J. On the Limited Memory Method for Large Scale Optimization // Mathematical Programming, 1989, B.45 (3): 503-528.
11. Pankratov O.V., Geraskin A.I. On processing of Controlled Source Electromagnetic (CSEM) Data // ActaGeofisica, 2010. T.8. N1. с. 31-49

Подробнее об авторах



Епишкин
Дмитрий Викторович

НТЦ «Северо-Запад»,
руководитель отдела
перспективных
разработок.

ЦГЭМИ ИФЗ РАН,
старший научный сотрудник.
Кандидат технических
наук.



Яковлев
Денис Васильевич

НТЦ «Северо-Запад»,
генеральный
директор.



Яковлев
Андрей Георгиевич

МГУ им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет,
доцент

ООО «Северо-Запад»,
главный специалист,
кандидат физико-
математических наук.