

УДК 550.380.83 / 004.42 / 004.021
РАС 93.85.Жк

ОСОБЕННОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОЙ АППАРАТУРЕ

© 2022 г. В.В. Бобровский

*Научная станция Российской академии наук, г. Бишкек, Кыргызская Республика
e-mail: bvlad77@mail.ru*

Представлен алгоритм устранения структурных помех, возникающих на кривых становления поля, в процессе корреляционной обработки зарегистрированных шумоподобных сигналов. Алгоритм основан на выявлении и выделении на фоне плавно (медленно) изменяющихся сигналов становления поля импульсных сигналов структурных помех, энергия которых превышает вычисляемый по кривой становления поля оптимальный порог обнаружения. Такой метод обеспечил надёжное, с высокой вероятностью правильного распознавания и малой вероятностью ложной тревоги, детектирование и дальнейшее устранение на получаемой кривой становления поля структурных помех. Предложен критерий автоматического вычисления оптимального порога обнаружения структурных помех, основанный на максимальном приближении к нормальному закону распределения оставшихся на кривой становления поля помех и шумов после удаления с неё структурных помех. Выбор и установление оптимального порога обнаружения производится в процессе последовательного перебора его значений (от максимального до минимального) с задаваемым шагом, определяющим точность выявления порога. Процедура нахождения порога обнаружения сводится к поиску максимального значения рассчитываемого на каждом шаге коэффициента корреляции Пирсона между функциями распределения плотности вероятности и вычисленного нормального закона распределения амплитуд шумов и помех, оставшихся на кривой зондирования после удаления структурных помех. Это позволило максимально автоматизировать процесс обработки данных и повысить её скорость, что очень важно при выполнении работ в полевых условиях. Отработка алгоритма проводилась на сигналах становления поля, полученных на экспериментальной точке “Чункурчак”, во время полевых работ с электроразведочным измерительным комплексом с шумоподобными сигналами. Применение алгоритма дало возможность значительно (примерно в 450 раз) улучшить соотношение сигнал/помеха на кривой становления поля в области больших времен.

Ключевые слова: электроразведка, шумоподобные сигналы, корреляционная обработка сигналов, структурные помехи.

Введение

Идея применения шумоподобных сигналов в геофизических исследованиях земной коры возникла достаточно давно. Одна из первых попыток их применения в активной электроразведке – работа канадских специалистов по использованию шумоподобных сигналов при электромагнитном зондировании земной коры [Duncan et al., 1980]. Установка представляла собой зондирующий электрический диполь длиной 20 км и разнесённые от него на значительные расстояния приёмные измерительные пункты с датчиками магнитного поля. Обработка заключалась в расчёте взаимной корреляционной функции (ВКФ) между регистрируемым и зондирующим сигналами с последующим вычислением частотного спектра ВКФ, по которому находилась одномерная зависимость кажущегося сопротивления горных пород от глубины. Указанная работа послужила прототипом разработанной отечественными специалистами электроразведочной аппаратуры с применением шумоподобных сигналов [Великин, 2009]. А.Б. Великин с коллегами

предложил новый корреляционный метод электроразведки с применением специальных шумоподобных сигналов СТЕМ и экспериментальный образец программно-аппаратурного комплекса СТЕМ-1 [Великин, Великин, 2016]. Основная задача СТЕМ-1 – поиск и обнаружение в земной коре полезных ископаемых, в частности углеводородного сырья, на глубинах до 4000 м.

Следует также отметить работу Б.С. Светова с коллегами [Светов и др., 2012], посвящённую применению шумоподобных сигналов в геоэлектрике. Математическим моделированием установки, расположенной на поверхности однородного полупространства и измеряющей в центре генераторной петли ЭДС, которая индуцировалась в петле малого размера, было проведено исследование близости получаемой взаимной корреляционной функции к истинной импульсной переходной характеристике среды. В работе было теоретически доказано преимущество использования псевдослучайных зондирующих последовательностей по сравнению с традиционными методами зондирования детерминированными последовательностями импульсов с фиксированными длительностью и периодом повторения.

В настоящее время на базе Научной станции Российской академии наук (НС РАН) в г. Бишкеке проводятся работы по совершенствованию действующей на территории Бишкекского геодинамического полигона системы активного электромагнитного мониторинга, основанной на электроразведочном методе зондирования становлением поля в дальней зоне и обеспечивающей контроль динамических процессов, которые происходят в земной коре на глубинах до 20 км [Гройсман, Трапезников, 1986; Трапезников и др., 1997; Ильичёв и др., 2010], включая верхнюю часть разреза до глубин первых километров.

Одно из направлений улучшения системы – расширение её возможностей за счёт использования и других методов активной электроразведки, в частности, метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Преимущество этого метода состоит в том, что разнос между источником и точкой наблюдения может быть значительно меньше исследуемой глубины [Алексанова и др., 2005]. Благодаря повышенной разрешающей способности указанного метода его применяют для более детального изучения структуры земной коры. Теоретически данный метод не имеет ограничений для достижения больших глубин зондирования. Однако практически такие ограничения существуют и связаны они с регистрацией сигналов в очень большом динамическом диапазоне (200 дБ и более) для получения больших глубин зондирования [Bobrovsky, Ilyichev, Lashin, 2021]. Обеспечить такой динамический диапазон регистрируемых сигналов только за счёт улучшения технических характеристик измерительной аппаратуры и применения стандартных (известных) алгоритмов цифровой обработки сигналов практически невозможно.

Для решения поставленной задачи в НС РАН ведётся разработка новой технологии активной электроразведки земной коры с применением специальных зондирующих шумоподобных последовательностей импульсов с большой базой (М-последовательностей). В этом случае, при корреляционной обработке принимаемого сигнала, осложнённого некоррелированными с ним помехами и шумом, с зондирующим сигналом, обеспечивается гораздо большее подавление шумов и помех, чем при классическом зондировании детерминированными сигналами. Отношение сигнал/шум на выходе такой системы увеличивается многократно – в 100 и более раз [Ильичев, Бобровский, 2014]. Кроме того, корреляционная обработка зарегистрированных сигналов позволяет непосредственно получать импульсную переходную характеристику земной коры, так как взаимно-корреляционная функция между регистрируемым на приёмной стороне сигналом становления поля и зондирующим сигналом представляет собой импульсную переходную характеристику земной коры [Ильичев, 2012]. В целях реализации этой

идеи был разработан и изготовлен экспериментальный образец измерительного комплекса с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС) и начаты работы в лабораторных и полевых условиях с указанным образцом по отработке новой технологии зондирования земной коры [Bobrovsky, Ilyichev, Lashin, 2021].

Частотный и динамический диапазоны регистрируемых сигналов – важные характеристики измерительного комплекса, обеспечивающие необходимую глубинность зондирования земной коры. Поэтому, одна из основных задач при разработке измерительного комплекса ЭРК ШПС – это расширение частотного и увеличение динамического диапазона измеряемых сигналов. Решение данной задачи достигается как за счёт совершенствования аппаратной части измерительного комплекса, так и за счёт разработки специальных алгоритмов обработки данных, обеспечивающих выделение полезного сигнала на фоне различного рода помех. Полевые и лабораторные эксперименты показали, что структурные помехи, которые проявляются в процессе корреляционной обработки зарегистрированных сигналов, – один из основных источников помех, существенно ограничивающих возможности эффективного использования шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре [Бобровский, Ильичев, 2018]. В настоящей работе представлен алгоритм (способ) обнаружения и последующего устранения данного типа помех.

Структурные помехи

В процессе проведения экспериментальных работ с измерительным комплексом ЭРК ШПС при получении кривых становления поля были выявлены важные особенности применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре. После корреляционной обработки регистрируемых шумоподобных сигналов на кривой становления поля в области больших времен проявляются так называемые структурные помехи в виде коротких импульсов (рис. 1). Форма и временное положение этих импульсов на кривой становления поля связаны с параметрами и структурой зондирующих и принимаемых шумоподобных сигналов, поэтому они получили такое название.

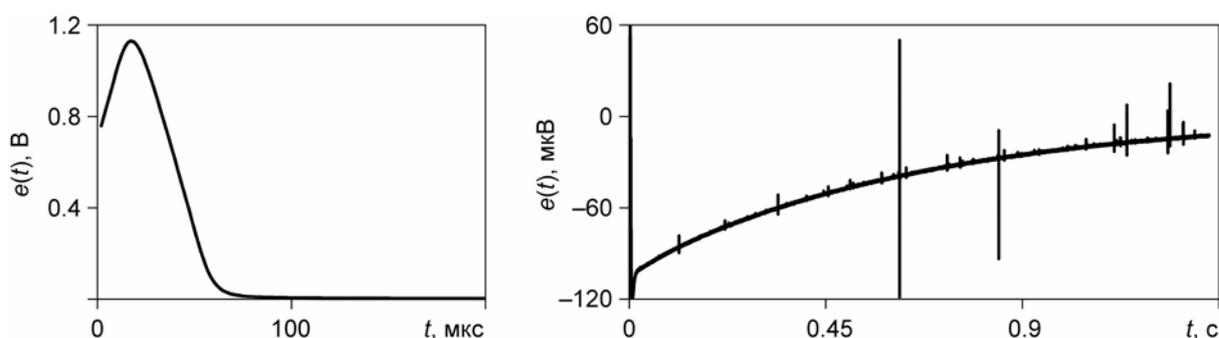


Рис. 1. Полученная на экспериментальной точке “Чункурчак” кривая становления поля $e(t)$ на малых (слева) и на больших (справа) временах становления

Fig. 1. The transient response curve $e(t)$, obtained at the experimental point “Chunkurchak” at short transient period (on the left) and at long transient period (on the right)

Структурные помехи представляют собой импульсы различной амплитуды и полярности (по отношению к кривой становления поля) с экспоненциальными фронтами нарастания и спада. На кривой становления поля эти импульсы располагаются в фиксированных точках, отстоящих от начала кривой на расстояниях кратных минимальной

длительности импульсов в зондирующей М-последовательности. В зависимости от параметров используемой зондирующей М-последовательности импульсы с максимальной амплитудой могут располагаться в разных точках по времени. Амплитуда импульсов структурных помех не уменьшается при синхронном накоплении периодов взаимных корреляционных функций, как это наблюдается для широкополосного белого шума, поскольку временное положение структурных помех в периодически повторяемых взаимных корреляционных функциях остаётся неизменным, а их амплитуда от периода к периоду меняется незначительно (рис. 2).

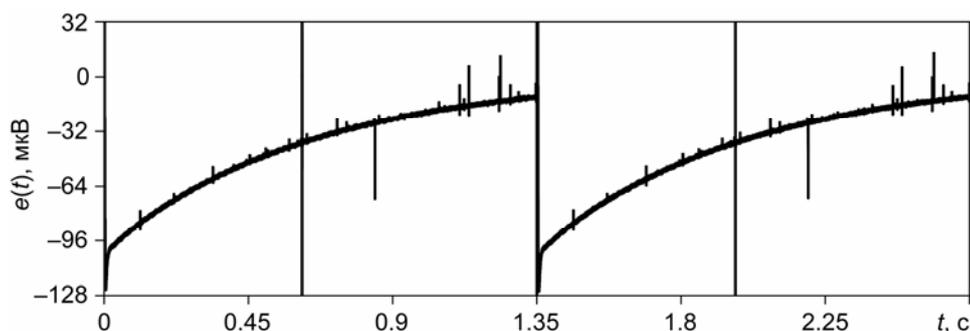


Рис. 2. Два периода взаимной корреляционной функции, полученной в результате корреляционной обработки зарегистрированного сигнала отклика среды с зондирующим сигналом

Fig. 2. Two periods of cross correlation function obtained as a result of correlation processing of the registered signal of response of the medium with a sounding signal

Структурные помехи существенно ограничивают возможности эффективного использования шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре из-за снижения соотношения сигнал/помеха на больших временах кривой становления поля, соответствующих большим глубинам зондирования. На больших временах становления поля амплитуда импульсов структурных помех становится соизмеримой с уровнем сигнала становления поля и даже может значительно превышать его (см. рис. 1, *справа*). Эти помехи невозможно подавить с помощью известных стандартных процедур цифровой обработки сигналов (например, частотной фильтрации) без искажения формы полезного сигнала становления поля. В работах [Бобровский, Ильичев, 2018; Ильичев, Бобровский, 2018] подробно рассмотрены и исследованы возможные причины появления структурных помех, основной из которых является нелинейность (даже очень малая, порядка 0.01 %) передаточных характеристик элементов, таких как операционные усилители, АЦП и т.п., составляющих измерительную систему, включая зондирующую часть измерительного комплекса, объект исследования (земную кору) и приёмную часть (измерительный канал). Из-за отсутствия в настоящее время необходимой элементной базы добиться снижения коэффициента нелинейных искажений измерительной аппаратуры до уровня значительно меньшего чем 0.01 % практически невозможно. Поэтому остаётся один способ борьбы со структурными помехами – это обнаружение их на кривой становления поля с последующим удалением.

Решение задачи по снижению влияния структурных помех на качество кривой становления поля, получаемой при обработке данных зондирования, разбивается на следующие этапы:

1) распознавание импульсов структурных помех на кривой становления поля осложнённой шумами и помехами, оставшимися после корреляционной обработки;

2) удаление выявленных импульсов структурных помех из кривой становления поля с минимальными искажениями её формы.

Обнаружение структурных помех

Процедура обнаружения структурных помех сводится к решению двух задач:

1) исключение медленно меняющихся составляющих из кривой становления поля, осложнённой импульсами структурных помех и оставшимися после корреляционной обработки и накопления помехами;

2) выделение на кривой становления поля структурных помех, т.е. определение точек на оси времени, соответствующих началу и окончанию каждого импульса структурной помехи.

Отклик земной коры на зондирующее воздействие $U(t)$ и сигнал становления поля с одиночным импульсом структурной помехи $e(t)$ представлены на рис. 3. Можно видеть, что наблюдается хорошее совпадение формы и длительности импульса T_{Π} структурной помехи с формой и длительностью минимального импульса T_{\min} в регистрируемом сигнале (шумоподобной M -последовательности).

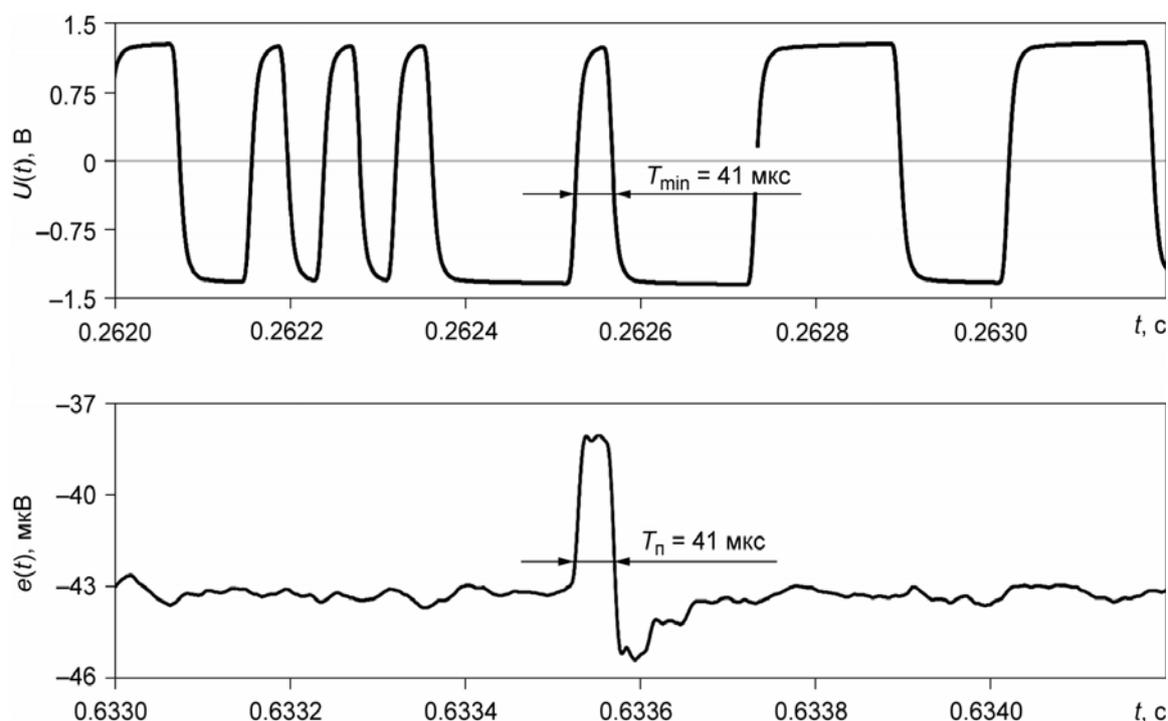


Рис. 3. Фрагменты двух сигналов: *вверху* – отклик земной коры на зондирующее воздействие $U(t)$, *внизу* – сигнал становления поля с импульсом структурной помехи $e(t)$. T_{\min} – длительность минимального импульса в регистрируемом сигнале; T_{Π} – длительность импульса структурной помехи

Fig. 3. Fragments of two signals: *above* – response of the Earth's crust to the sounding impact $U(t)$, *below* – transient signal with an impulse of structural disturbance $e(t)$. T_{\min} – the duration of the minimum impulse in the recorded signal; T_{Π} – the duration of structural disturbance impulse

Структурные помехи оказывают существенное влияние на соотношение сигнал/помеха только на больших временах кривой становления поля (см. рис. 1, *справа*), поэтому выявление импульсов структурных помех проводится на этом участке кривой. Кривая становления поля в области больших времен (без шумов и других непрерывных помех) представляет собой медленно меняющуюся монотонную функцию. Для определения импульсов структурных помех на зарегистрированной кривой становления поля,

осложнённой оставшимися после корреляционной обработки и накопления широкополосными шумами и тональными помехами (помехи от силовой промышленной сети, шумы аппаратуры), необходим переменный порог обнаружения в зависимости от временного расположения распознаваемых импульсов на кривой становления поля.

В настоящем исследовании предложен и опробован другой – более простой способ детектирования структурных помех. Этот способ заключается в выделении их на разностной кривой, которая получается вычитанием из кривой становления поля её медленно меняющейся (низкочастотной) составляющей, вычисляемой с помощью методов полиномиальной аппроксимации высоких порядков (9 и выше) или аппроксимации сплайном Эрмита. Большой интерес представляет модификация этих методов, позволяющая повысить точность аппроксимации, которая изложена в работах [Шумилов, 2013; Dikusar, 2016; Rababah, 2019; Bénétiau, Centner, 2021]. Такой способ аппроксимации даёт хороший результат для больших времен становления поля с медленно меняющейся составляющей, где структурные помехи наиболее выражены. Для аппроксимации кривой становления поля на малых временах, где наблюдается высокая скорость изменения сигнала становления поля, возможно применение метода, описанного в работе [Маркочев, 2018]. Этапы процедуры исключения медленно меняющейся составляющей из кривой становления поля отражены на рис. 4.

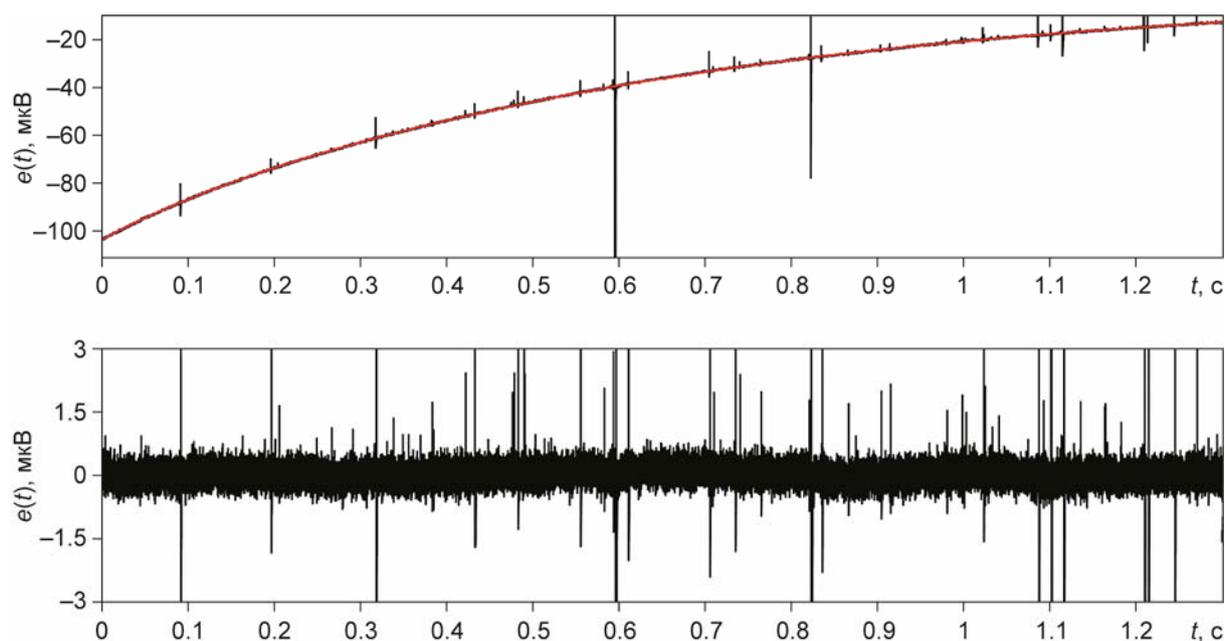


Рис. 4. Исключение медленно меняющейся составляющей из кривой становления поля. *Вверху:* первичная кривая становления поля (черный график) и результат её аппроксимации степенным полиномом 9 порядка (красный график); *внизу:* разность между кривой становления поля и её аппроксимацией

Fig. 4. Exclusion of the slowly varying component from the transient response curve. *Above:* primary transient response curve (black graph) and the result of its approximation by the 9th order power polynomial (red graph); *below:* difference between the transient response curve and its approximation

Видно, что структурные помехи остаются на прежних местах и выявить их можно при постоянном (фиксированном) пороге для всей кривой становления поля (см. рис. 4, *внизу*). Для распознавания структурных помех был применён способ, используемый в похожей задаче обнаружения импульсов акустической эмиссии образцов горных пород.

Идея его заключается в поиске превышения сигналом заданного порога по энергии. При этом обеспечивается высокая вероятность (более 0.9) правильного детектирования импульсных сигналов на фоне широкополосных шумов даже при малом соотношении сигнал/шум близком к единице [Ильичев и др., 2003].

Применительно к задаче обнаружения импульсов структурных помех на кривой становления поля $e(t)$ энергия этого сигнала $W(t)$, вычисляемая в скользящем временном окне фиксированной длительности T_0 , определяется выражением:

$$W(t) = \int_{t-(T_0/2)}^{t+(T_0/2)} P(\tau) d\tau,$$

где $P(t) = e^2(t)/R_H$ – мгновенная мощность сигнала $e(t)$ (R_H – электрическое сопротивление нагрузочного резистора, на котором выделяется энергия сигнала).

Построенные по экспериментальным данным графики мгновенной мощности $P(t)$ сигнала становления поля с удалённой медленно меняющейся составляющей $e(t)$ и его энергии $W(t)$, которая вычисляется в скользящем окне длительностью $T_0 = T_{\min} = 41$ мкс (см. рис. 3), представлены на рис. 5.

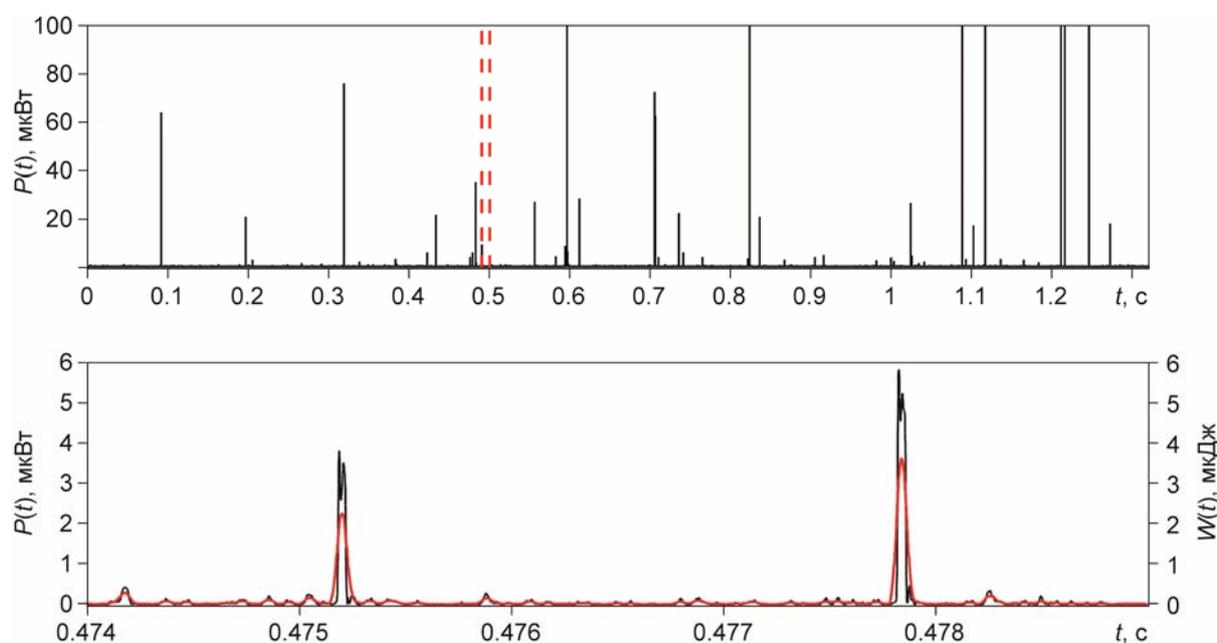


Рис. 5. Сигналы, полученные в результате дополнительной обработки кривой становления поля (см. рис. 1). *Вверху:* мгновенная мощность $P(t)$ сигнала становления поля после удаления медленно меняющейся составляющей; красные штриховые линии – границы интервала, представленного в более крупном масштабе (*внизу*). Красная кривая – энергия сигнала $W(t)$

Fig. 5. Signals obtained as a result of additional processing of the transient response curve (see Fig. 1). *Above:* instantaneous power $P(t)$ of the transient signal after the removal of slowly varying component; red dashed lines are the boundaries of the interval presented on a larger scale (*below*). Red curve is the signal energy $W(t)$

Графики $P(t)$ и $W(t)$ построены в одних координатных осях. Для построения графиков в одном масштабе по вертикальной оси при расчёте $P(t)$ величина сопротивления нагрузки была принята равной $R_H=1$ Ом, а вычисление $W(t)$ проводилось с помощью медианного фильтра Дирихле [Гутников, 1990] второго порядка с окном длительностью $T_0=41$ мкс. Оптимальная длительность окна фильтра равна длительности минимального импульса зондирующей М-последовательности $T_0 = T_{\min}$.

Преобразование сигнала $P(t)$ с помощью фильтра Дирихле не нарушает математической процедуры вычисления энергии сигнала $W(t)$ через интеграл от мгновенной мощности сигнала. Форма получаемой при этом функции $W(t)$ не меняется. На рис. 6 представлены графики, иллюстрирующие работу алгоритма при обнаружении импульсов структурных помех.

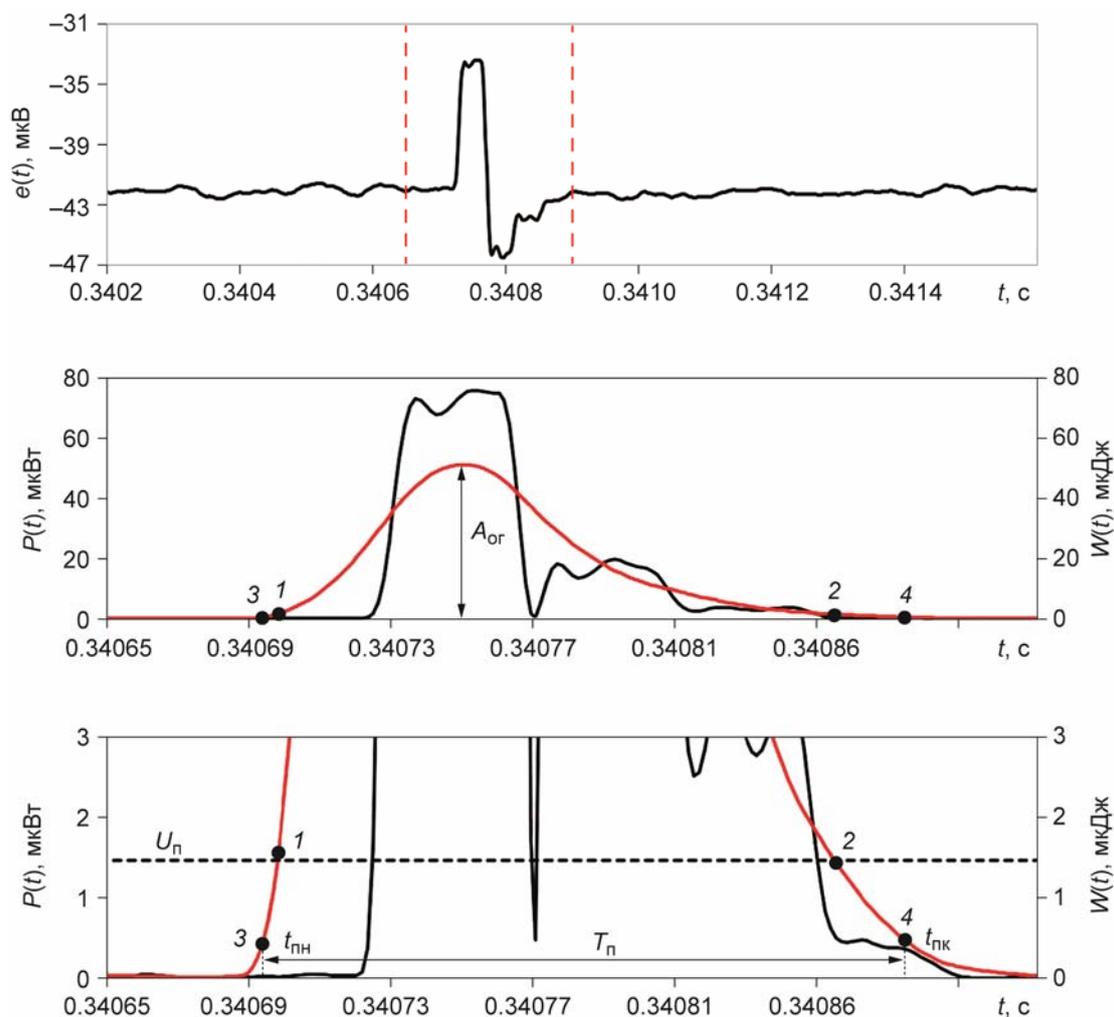


Рис. 6. Обнаружение импульсов структурных помех. *Вверху:* сигнал становления поля с импульсами структурной помехи; *по центру и внизу:* графики мгновенной мощности ($P(t)$, черные кривые) и энергии сигнала ($W(t)$, красные кривые) в разных масштабах по вертикальной оси для участка сигнала становления поля, выделенного красными штриховыми линиями. $A_{ог}$ – максимальное значение энергии импульса структурной помехи; 1, 2 – его начало и конец, найденные по порогу обнаружения $U_{п}$; 3, 4 – начало и конец, определённые в процессе работы алгоритма; $t_{пн}$, $t_{пк}$ – время начала и окончания помехи; $T_{п}$ – длительность участка сигнала с помехой

Fig. 6. Detection of impulses of structural disturbances. *Above:* transient signal with impulses of structural disturbance; *in the center and below:* graphs of instantaneous power ($P(t)$, black curves) and signal energy ($W(t)$, red curves) on different scales along the vertical axis for the section of the transient signal highlighted by red dashed lines. $A_{ог}$ is the maximum value of the structural disturbance impulse energy; 1, 2 are the beginning and the end of the structural disturbance impulse found by the detection threshold $U_{п}$; 3, 4 are the beginning and the end of the structural disturbance impulse found in the process of the algorithm operation; $t_{пн}$, $t_{пк}$ are times of the beginning and the end of the disturbance; $T_{п}$ is the duration of the signal section with disturbance

Рассмотрим работу алгоритма обнаружения структурных помех на участке, выделенном красными штриховыми линиями (см. рис. 6, *вверху*). Процесс выявления разделяется на пять последовательных этапов.

1. Определение по графику $W(t)$ порога обнаружения $U_{\text{П}}$ структурных помех (см. рис. 6, *внизу*). Значение порога выбирается таким образом, чтобы не искажались (не обрезались) оставшиеся после корреляционной обработки непрерывные шумы и помехи, которые наблюдаются в промежутках между импульсами структурных помех.

2. Нахождение на графике $W(t)$ точек по времени, между которыми сигнал $W(t)$ превышает значение выбранного порога (см. рис. 6, *внизу*, точки 1, 2). Полученные точки считаются точками начала и окончания импульса структурной помехи по порогу обнаружения.

3. Установление максимального значения энергии импульса структурной помехи $A_{\text{ОГ}}$ в промежутке между точками 1 и 2.

4. Далее выполняется перемещение по графику $W(t)$ влево и вправо от точки с максимальной амплитудой $A_{\text{ОГ}}$ до тех пор, пока уровень сигнала $W(t)$ не достигнет задаваемого оператором в процентах от $A_{\text{ОГ}}$ значения либо пока не произойдет смена знака скорости изменения функции $W(t)$, т.е. пока не нарушится её монотонность. Найденные точки считаются точками начала и окончания импульса структурной помехи (точки 3, 4).

5. Этапы 2–4 повторяются для всех импульсов структурных помех. В результате, формируется массив времён начала ($t_{\text{ПН}}$) и окончания ($t_{\text{ПК}}$) всех найденных импульсов структурных помех. При вычислении за точку начала отсчёта времени берётся начальная точка для полного графика кривой становления поля.

Удаление структурных помех

Процедура устранения выявленных импульсов структурных помех с кривой становления поля сводится к аппроксимации участка сигнала, включающего структурную помеху, прямой линией, которая проходит через найденные точки начала и окончания импульса структурной помехи. На рис. 7 показан результат исключения обнаруженного импульса структурной помехи. Поскольку длительность удаляемых участков сигнала с импульсами значительно меньше длительности временных интервалов между ними, то замена их на прямую линию практически не влияет на форму кривой становления поля.

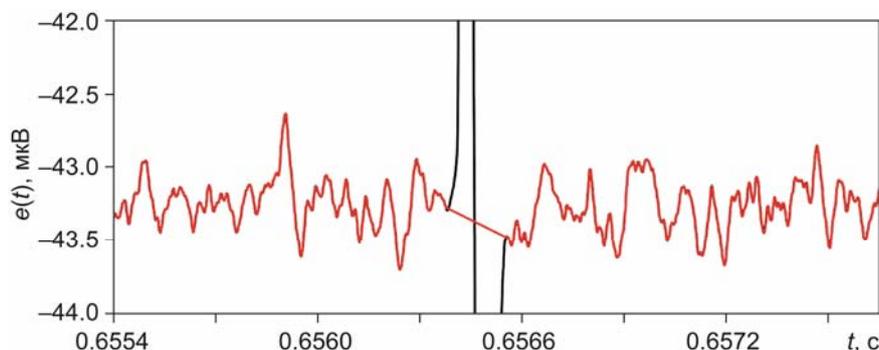


Рис. 7. Участок кривой становления поля до (черный график) и после (красный график) устранения обнаруженного импульса структурной помехи

Fig. 7. Section of the transient response curve before (black) and after (red) elimination of the detected impulse of structural disturbance

Выбор порога обнаружения

Самый важный этап при распознавании структурных помех, от которого в значительной мере зависит качество и достоверность получаемой кривой становления поля, – это этап определения (выбора) порога обнаружения структурных помех. Рис. 8 демонстрирует работу алгоритма устранения структурных помех при различных порогах обнаружения. Для лучшей иллюстрации уровня помех на кривых становления поля (рис. 8, *слева*) из них была исключена медленно меняющаяся составляющая (см. рис. 4, *внизу*).

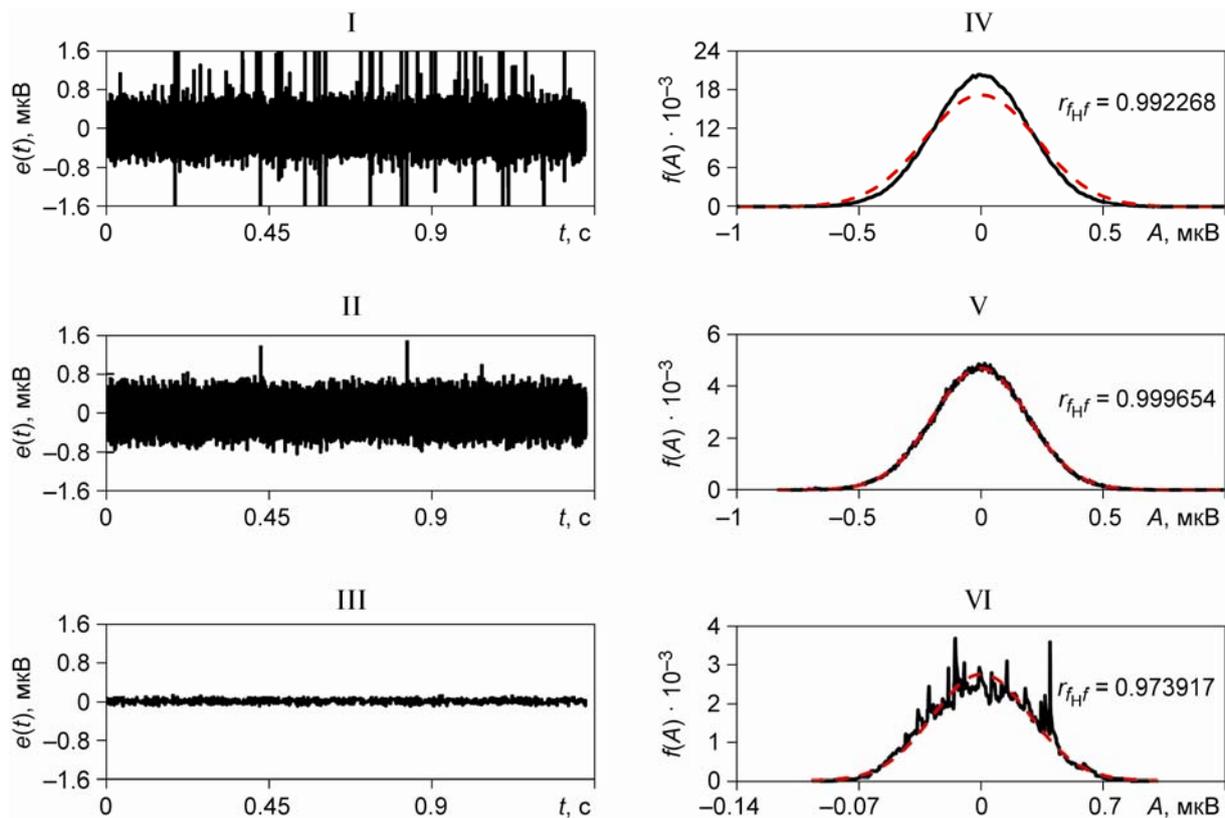


Рис. 8. Кривые становления поля после удаления структурных помех (*слева*) и графики распределения плотности вероятности этих сигналов (*справа*, черные графики) при завышенном (*вверху*), искомом (*в центре*) и заниженном (*внизу*) пороге обнаружения. Красные графики – нормальный закон распределения сигналов $f_H(A)$; r_{f_Hf} – коэффициент корреляции Пирсона

Fig. 8. Transient response curves after the removal of structural disturbances (*on the left*) and graphs of the probability density distribution of these signals (*on the right*, black graphs) when the detection threshold is overestimated (*above*), required (*center*) and underestimated (*below*). Red curves is normal law of signal distribution $f_H(A)$; r_{f_Hf} is Pearson correlation coefficient

Результат удаления структурных помех с завышенным порогом обнаружения, при котором исключается только часть импульсов структурных помех, представлен на рис. 8, I. График кривой становления поля $e(t)$ показан в масштабе по вертикальной оси, при котором импульсы структурных помех становятся различимыми на этой кривой. На рис. 8, II – результат удаления структурных помех с порогом обнаружения, при котором распознаются только импульсы структурных помех (искомый порог). Дальнейшее снижение порога обнаружения (рис. 8, III) приводит к тому, что в зону обнаружения кроме

импульсов структурных помех попадают другие непрерывные помехи и шумы, оставшиеся после корреляционной обработки и накопления (заниженный порог). При последующем снижении порога обнаружения работа алгоритма приводит к кусочно-линейной аппроксимации, которая не может гарантировать получения качественной кривой становления поля из-за того, что при этом вносятся нелинейные искажения в форму кривой становления поля (плавная гладкая функция заменяется ломаной линией). Оптимальным для выявления и последующего удаления импульсов структурных помех оказывается порог, работа которого проиллюстрирована на рис. 8, II.

Графики распределения плотности вероятности $f(A)$ и нормального закона распределения $f_H(A)$ сигналов становления поля с удалёнными структурными помехами при различных порогах обнаружения приведены на рис. 8, *справа*. Для построения графиков распределения диапазон изменения амплитуд сигнала A разбивался на n равных интервалов $A^n=(A_1, \dots, A_n)$. Плотность вероятности для нормального закона распределения вычислялась по следующей формуле:

$$f_H(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(A-\mu)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где μ – математическое ожидание; σ – среднеквадратичное отклонение.

Проанализировав рисунки, можно видеть, что условием оптимального порога обнаружения структурных помех является минимальное отклонение графика $f(A)$ от графика $f_H(A)$. В качестве численного критерия при определении порога рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона ($r_{f_H f}$) между вычисленным распределением плотности вероятности и функцией нормального закона распределения для сигнала становления поля с удалёнными структурными помехами:

$$r_{f_H f} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{H_i} - \overline{f_H})(f_i - \overline{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{H_i} - \overline{f_H})^2 \sum_{i=1}^n (f_i - \overline{f})^2}},$$

где f_H и f – выборки плотности вероятности для нормального закона распределения и сигнала соответственно; $\overline{f_H}$ и \overline{f} – выборочные средние; n – число значений в выборке.

Таким образом, поиск порога обнаружения сводился к поиску максимального значения коэффициента корреляции $r_{f_H f}$, который вычислялся при переборе значений порога обнаружения от завышенного до заниженного с заданным шагом, определяющим точность поиска.

Обработка алгоритма

Изложенный выше алгоритм реализован в программе обработки данных модельных, лабораторных и полевых экспериментов измерительного комплекса ЭРК ШПС [Бобровский, Ильичёв, 2019]. Обработка алгоритма проводилась на кривых зондирования, которые были получены в результате корреляционной обработки сигналов становления поля, зарегистрированных на экспериментальной точке “Чункурчак” в 2020 г. На рис. 9 представлены исходная и очищенная от структурных помех кривая становления поля. Поскольку используемый индукционный датчик сигналов не является идеальным интегратором, особенно в области больших времён, то полученная кривая становления поля располагается в основном в области отрицательных значений (рис. 9, *вверху*). Для визуализации соотношения сигнал/помеха во всем динамическом диапазоне сигналов (становление поля плюс помехи) на рис. 9, *внизу* приводится модуль этой кривой в билогарифмическом масштабе.

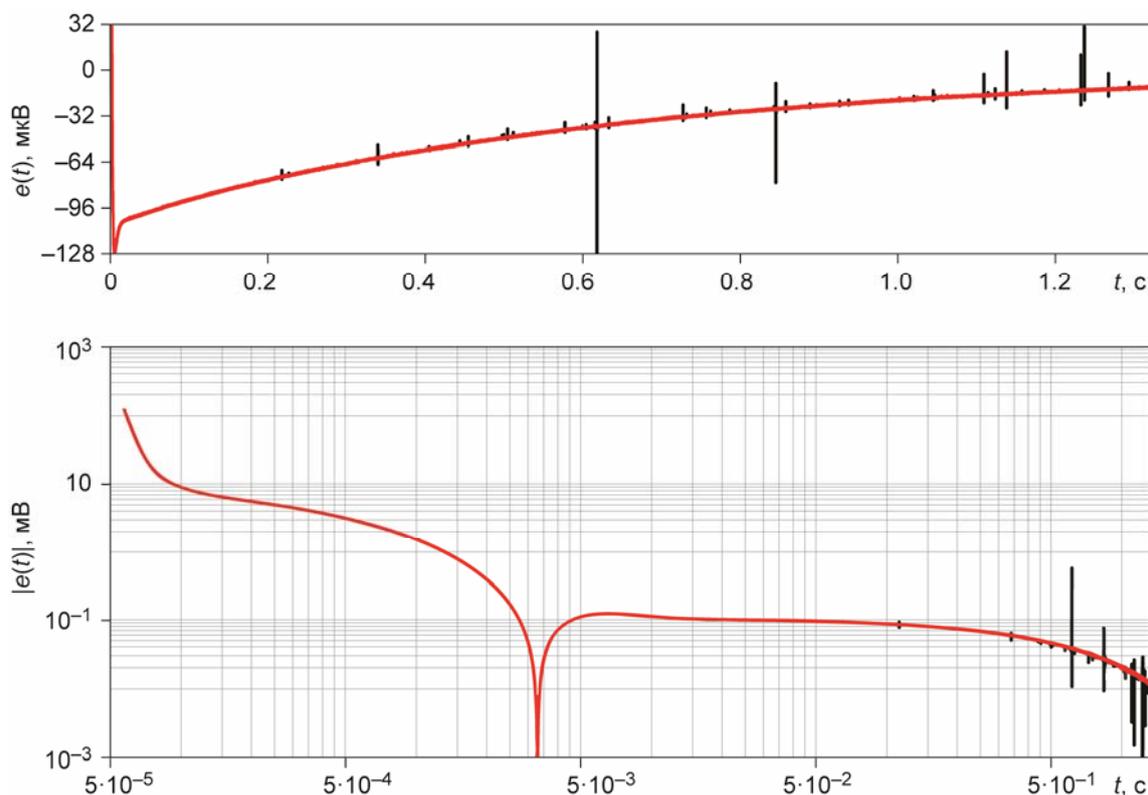


Рис. 9. *Вверху:* кривая становления поля в линейном масштабе времени, полученная на экспериментальной точке “Чункурчак” в 2020 г. *Внизу:* модуль сигнала становления поля в билогарифмическом масштабе времени. Черный график – исходный сигнал, красный – сигнал после устранения структурных помех

Fig. 9. *Above:* the transient response curve, obtained at the experimental point “Chunkurchak” in a linear time scale in 2020. *Below:* the modulus of the transient signal in the logarithmic time scale. Black curve is the original signal, red curve is the signal after the removal of structural disturbances

Истинная кривая становления поля получается путём приведения сигнала ко входу измерительного канала, в качестве которого используется измерительная катушка индукционного датчика сигналов, с учётом частотной (импульсной переходной) характеристики всего измерительного канала, включая индукционный датчик сигналов. Пока данная задача решена не полностью [Bobrovsky, Ilyichev, Lashin, 2021]. Разработка алгоритмов по приведению сигнала становления поля ко входу измерительного канала продолжается в настоящее время.

В результате удаления структурных помех при обработке полевых данных уровень помех на кривой становления поля (см. рис. 8, II), вычисляемый как размах оставшихся помех от пика до пика, снизился на 53 дБ, т.е. примерно в 450 раз по сравнению с уровнем структурных помех (от пика до пика) на кривой становления до их удаления (см. рис. 1, *справа*).

Выводы

Представленный в работе алгоритм устранения структурных помех, основанный на способе распознавания сигналов по их энергии, позволяет надёжно (с высокой вероятностью) находить и исключать структурные помехи, которые возникают на получаемой в результате корреляционной обработки кривой становления поля.

Предложенный критерий автоматического поиска оптимального порога обнаружения структурных помех, который основан на максимальном приближении распределения плотности вероятности остаточных помех и шумов к нормальному закону, даёт возможность предельно автоматизировать процесс удаления такого рода помех и тем самым повысить скорость обработки данных в условиях полевых работ.

Устранение структурных помех допускает использование для подавления оставшихся помех и шумов стандартных алгоритмов цифровой фильтрации сигналов.

Финансирование

Работа проводилась в рамках выполнения Государственного задания по теме: “Разработка аппаратно-программных средств и основ технологии электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах и оценки их опасностей”. Шифр научной темы: FMNN-2019-0004. Номер государственного учёта: АААА-А19-119020190065-6.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Алексанова Е.Д., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Иванова С.В., Куликов В.А., Модин И.Н., Пушкарев П.Ю., Хмелевской В.К., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г.* Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М.: ГЕРС, 2005. С.240, 251–253.
- Бобровский В.В., Ильичев П.В.* Математическое моделирование предполагаемых источников (причин) “структурных помех” в геоэлектроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докл. VII Междунар. симпозиума, г. Бишкек, 19–24 июня 2017 г. Бишкек: ИС РАН, 2018. С.360–370.
- Бобровский В.В., Ильичёв П.В.* Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19, № 12. С.77–83.
- Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А.* Широкополосный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами для электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57, № 1, С.29–48. doi: 10.21455/si2021.1-3
- Великин А.Б.* Способ электроразведки и устройство для его осуществления: Патент РФ на изобретение № 2354999 от 10.05.2009.
- Великин А.Б., Великин А.А.* Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ для электромагнитного зондирования недр при поисках углеводородного сырья // Вопросы естествознания. 2016. № 1. С.103–115.
- Гройсман Ф.Е., Трапезников Ю.А.* Аппаратурные разработки для геофизических исследований электромагнитными методами. М.: ИФЗ АН СССР, 1986. С.86–98.
- Гутников В.С.* Фильтрация измерительных сигналов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 193 с.
- Ильичев П.В., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Бобровский В.В., Закупин А.С., Сычев В.Н.* Параметры акусто-эмиссионных сигналов, инициированных электровоздействием на нагруженные образцы // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов: Сборник материалов Второго международного симпозиума, г. Бишкек, 29 октября – 3 ноября 2002 г. Бишкек: ОИВТАН, 2003. С.286–303.

- Ильичёв П.В., Брагин В.Д., Щелочков Г.Г., Бобровский В.В., Мясников Д.С., Закупина Г.С.* Система активного электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон земной коры: Патент РФ на изобретение № 2408037, кл. G01V3/08. 2010.
- Ильичев П.В.* Технологические аспекты применения шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки, математическое моделирование // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы 5-го Международного симпозиума, г. Бишкек, 19–24 июня 2011 г. Бишкек: НС РАН, 2012. Т. 2. С.165–178.
- Ильичев П.В., Бобровский В.В.* Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2. С.5–19.
- Ильичев П.В., Бобровский В.В.* Вариации уровня нелинейных искажений электрических сигналов в земной коре как контролируемый параметр геофизического мониторинга // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18, № 12. С.108–112.
- Маркочев В.М.* Аппроксимация экспериментальных зависимостей, описывающих резкое изменение состояния объекта исследований // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 4. С.73–83.
- Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В., Каринский С.Д., Яковлев А.Г.* Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. 2012. № 1. С.52–60.
- Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Ильичев П.В., Орленко Н.Н., Иванов Е.И., Матикс А.И., Коновалов С.М.* Геофизическая система сбора и обработки информации: Патент РФ на изобретение № 2091820, кл. G01V3/08. 1/22. 1997.
- Шумилов Б.М.* Мультивейвлеты эрмитовых сплайнов третьей степени, ортогональные кубическим многочленам // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 4. С.17–28.
- Bénéteau C., Centner R.* A survey of optimal polynomial approximants, applications to digital filter design, and related open problems // Complex Analysis and its Synergies. 2021. N 7. P.1–26.
- Dikusar N.D.* Higher-order polynomial approximation // Mathematical Models and Computer Simulations. 2016. V. 8. P.183–200. DOI: 10.1134/S2070048216020058
- Duncan P.M., Bailey R.C., Edwards R.N., Garland G.D., Ywang A.* The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using pseudo-noise source // Geophysics. 1980. V. 45, N 8. P.1276–1296.
- Rababah A.* High order approximation of degree nine and order eighteen // Journal of Inequalities and Applications. 2019. V. 2019. P.1–10. DOI: 10.1186/s13660-019-2103-x

Сведения об авторе

БОБРОВСКИЙ Владимир Владимирович – научный сотрудник, Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке. 720049, Кыргызская Республика, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. Тел.: +7(996) 500-917-911. E-mail: bvlad77@mail.ru

PECULIARITIES OF CORRELATION PROCESSING OF PSEUDONOISE SIGNALS IN ELECTRICAL PROSPECTING EQUIPMENT

V.V. Bobrovsky

*Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic
e-mail: bvlad77@mail.ru*

Abstract. The paper presents an algorithm for eliminating structural disturbances arising on the transient response curve in the process of correlation processing of the registered pseudonoise signals. The algorithm is based on the detection and selection of impulse signals of structural disturbances against the background of smoothly (slowly) varying transient. The energy of detected impulse signals of structural disturbances exceeds

the optimal detection threshold calculated from the transient response curve. This method provided reliable, with a high probability of correct detection and a low probability of a false alarm, detection and further elimination on the resulting transient response curve of structural disturbances. A criterion for automatic calculation of the optimal threshold for detecting structural disturbances is proposed, based on the maximum approximation to the normal distribution law of the disturbances and noises remaining on the transient response curve after removing structural disturbances from it. The choice and determination of the optimal detection threshold is carried out in the process of sequential enumeration of its values (from maximum to minimum) with a set step that determines the accuracy of determining the threshold. The procedure for finding the detection threshold is reduced to finding the maximum value of the Pearson correlation coefficient calculated at each step between the probability density distribution functions and the calculated normal distribution law of the amplitudes of noises and disturbances remaining on the transient response curve after removing the structural disturbances. This made it possible to automate the data processing process to the maximum and increase its speed, which is very important when performing work in the field. The algorithm was worked out on transient signals, obtained at the experimental point “Chunkurchak”, during the field work with an electrical prospecting measuring complex with pseudonoise signals. The application of the algorithm made it possible to significantly (approximately by 450 times) improve the signal-to-noise ratio on the transient response curve in the region of large times.

Keywords: geoelectrical exploration, pseudonoise signals, correlation processing of signals, structural disturbances

Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment on the topic: “Development of Hardware and Software and Basics of Technology for Electromagnetic Monitoring of Geodynamic Processes in Seismically Active Zones and Assessment of Their Hazard.” Scientific topic code: FMNN-2019-0004. State registration no.: AAAA-A19-119020190065-6.

Conflict of interest

The author declare he has no conflict of interest.

References

- Aleksanova E.D., Bobachev A.A., Bol'shakov D.K., Gorbunov A.A., Ivanova S.V., Kulikov V.A., Modin I.N., Pushkarev P.Yu., Khmelevskoi V.K., Shustov N.L., Yakovlev A.G., *Elektrorazvedka: Posobie po elektro-razvedochnoi praktike dlya studentov geofizicheskikh spetsial'nostei* (Electrical Prospecting: A Guide to Electrical Exploration Practice for Students of Geophysical Specialties), Moscow: GERS, 2005, pp. 240, 251-253. [In Russian].
- Bénéteau C., Centner R., A survey of optimal polynomial approximants, applications to digital filter design, and related open problems, *Complex Analysis and its Synergies*, 2021, no. 7, pp. 1-26.
- Bobrovskii V.V., Il'ichev P.V., Mathematical modeling of alleged sources (causes) of “structural interference” in geoelectrical prospecting equipment with pseudonoise sounding signals, in *Problemy geodinamiki i geoekologii vnutrikontinental'nykh orogonov: Materialy dokl. VII Mezhdunar. simpoziuma, g. Bishkek, 19–24 iyunya 2017 g.* (Problems of Geodynamics and Geoecology of Inland Orogens: Proc. VII Int. Symposium), Bishkek: NS RAN, 2018, pp. 360-370. [In Russian].
- Bobrovskii V.V., Il'ichev P.V., Software for processing data of registration and modeling of an electrical prospecting complex with pseudonoise signals, *Vestnik KRSU* (Vestnik KRSU), 2019, vol. 19, no. 12, pp. 77-83. [In Russian].
- Bobrovskii V.V., Il'ichev P.V., Lashin O.A., Broadband Measuring Complex with Pseudonoise Signals for Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes in Seismically Active Zones, *Seismic Instruments*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 384-396. DOI: 10.3103/S0747923921040034
- Dikusar N.D., Higher-order polynomial approximation, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2016, vol. 8, pp. 183-200. DOI: 10.1134/S2070048216020058
- Duncan P.M., Bailey R.C., Edwards R.N., Garland G.D., Ywang A., The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using pseudo-noise source, *Geophysics*, 1980, vol. 45, no. 8, pp. 1276-1296.

- Groisman F.E., Trapeznikov Yu.A., *Apparaturnye razrabotki dlya geofizicheskikh issledovaniy elektromagnitnymi metodami* (Hardware Advances for Geophysical Research by Electromagnetic Methods), Moscow: IFZ AN SSSR, 1986, pp. 86-98. [In Russian].
- Gutnikov V.S., *Fil'tratsiya izmeritel'nykh signalov* (Filtration of measuring signals), Leningrad: Energoatomizdat, Leningrad. department, 1990, 193 p. [In Russian].
- Il'ichev P.V., Technological aspects of using pseudonoise signals in active geoelectrical prospecting systems, mathematical modeling, in *Sovremennye problemy geodinamiki i geoekologii vnutrikontinental'nykh orogonov: Materialy 5-go Mezhdunarodnogo simpoziuma, g. Bishkek, 19–24 iyunya 2011 g.* (Current Problems of Geodynamics and Geoecology of Inland Orogens: Proc. 5th International Symposium, Bishkek, June 19–24, 2011), Bishkek: NS RAN, 2012, vol. 2, pp. 165-178. [In Russian].
- Ilyichev P.V., Bobrovsky V.V., Application of pseudonoise signals in systems of active geoelectric exploration (Results of mathematical simulation and field experiments), *Seismic Instruments*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 53-64. DOI: 10.3103/S0747923915010089
- Il'ichev P.V., Bobrovskii V.V., Variations in the level of nonlinear distortions of electrical signals in the Earth's crust as a controlled parameter of geophysical monitoring, *Vestnik KRSU* (Vestnik KRSU), 2018, vol. 18, no. 12, pp. 108-112. [In Russian].
- Il'ichev P.V., Bragin V.D., Shchelochkov G.G., Bobrovskii V.V., Myasnikov D.S., Zakupina G.S., System of active electromagnetic monitoring of seismically active zones of the earth's crust, *RF Patent 2408037 kl. G01V3/08*, 2010.
- Il'ichev P.V., Aladiev A.V., Bogomolov L.M., Bobrovskii V.V., Zakupin A.S., Sychev V.N., Parameters of acoustic emission signals initiated by electric impact on loaded samples, in *Geodinamika i geoekologicheskie problemy vysokogornyykh regionov: Sbornik materialov Vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma, Bishkek, 29 oktyabrya – 3 noyabrya 2002 g.* (Geodynamics and geoecological problems of high mountain regions: Collection of materials of the Second International Symposium, Bishkek, October 29 – November 3, 2002), Bishkek: OIVTAN, 2003, pp. 286-303. [In Russian].
- Markochev V.M., The approximation of experimental dependences describing the abrupt change of condition of object of research, *Matematicheskoe modelirovaniye* (Mathematical modeling), 2018, vol. 30, no. 4, pp. 73-83. [In Russian].
- Rababah A., High order approximation of degree nine and order eighteen, *Journal of Inequalities and Applications*, 2019, vol. 2019, pp. 1-10. DOI: 10.1186/s13660-019-2103-x
- Shumilov B.M., Multiwavelets of the third degree Hermitian splines, orthogonal to cubic polynomials, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2013, vol. 5, pp. 511-519.
- Svetov B.S., Alekseev D.A., Ageev V.V., Karinskiy S.D., Yakovlev A.G., Field establishment probe with noise-like signals, *Geofizika* (Geophysics), 2012, no. 1, pp. 52-60. [In Russian].
- Trapeznikov Yu.A., Bragin V.D., Il'ichev P.V., Orlenko N.N., Ivanov E.I., Matiks A.I., Konovalov S.M., Geophysical system for collecting and processing information, *RF Patent 2091820, kl. G01V3/08*, 1997.
- Velikin A.B., Electrical prospecting method and device for its implementation, *RF Patent No. 2354999*, 2009.
- Velikin A.B., Velikin A.A., A new correlation transient electromagnetic method with noise-like signals (CTEM) for earth electromagnetic sounding in oil and gas, *Voprosy yestestvoznaniya* (Questions of natural science), 2016, no. 1, pp. 103-115. [In Russian].

About the author

BOBROVSKY Vladimir Vladimirovich – Researcher, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek. Research Station RAS, Bishkek-49, 720049, Kyrgyz Republic. Ph.: +7(996) 500-917-911. E-mail: bvlad77@mail.ru