Применение фильтра обнаружения в георадиолокации

- Романов В.В., Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва
- Латышев К. А., Матюшенко А. А., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.

Аннотация: *в статье приводится пример применения оптимального фильтра обнаружения к данным георадиолокации. Предложен алгоритм построения характеристики фильтра на основе значений автокорреляционной функции трасс радарограммы.*

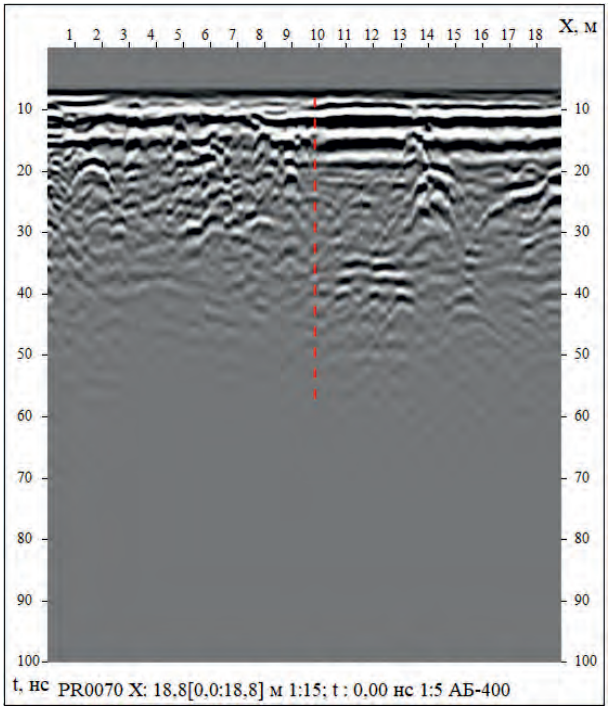
Ключевые слова: *георадиолокация, адаптивная фильтрация, фильтр воспроизведения.*

Введение

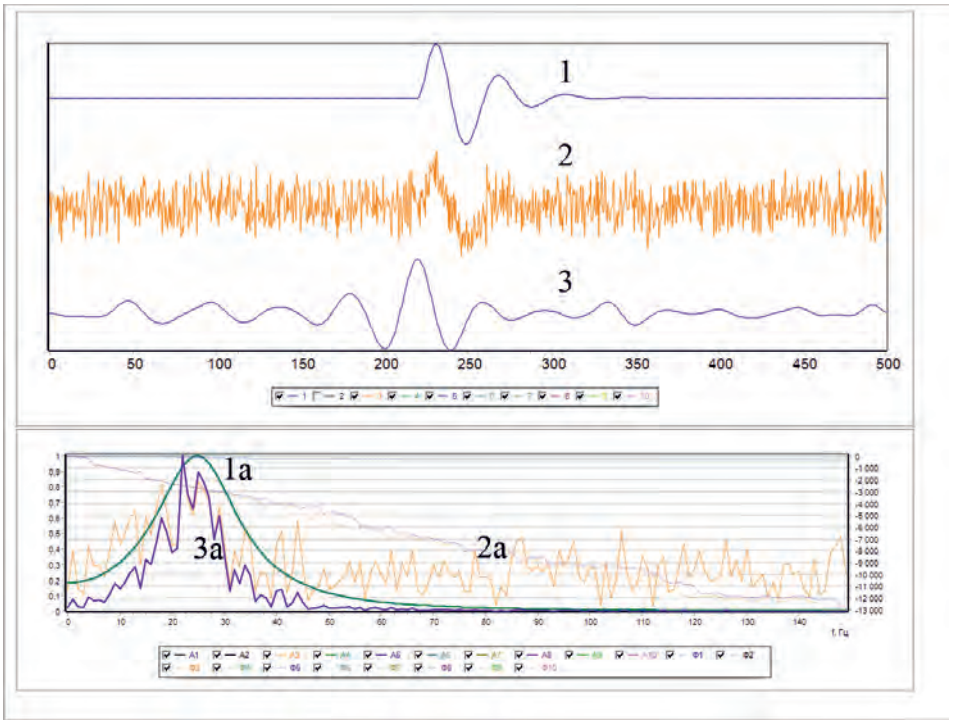
Оптимальная (адаптивная, самонастраивающаяся) фильтрация служит мощным инструментом для обработки нестационарных полей, уровень которых значительно изменяется в пространстве и времени[Петров и др., 2017]. В георадиолокации нестационарность поля возникает, как правило, из-за влияния поверхностных условий (Рисунок 1).

Оптимальный фильтр обнаружения (согласованный) предложен Норсом в 1943 году, его характеристики вычисляются на основе критерия максимизации пикового отношения сигнал/помеха на выходе фильтра[Никитин, 2014]. Наименование «согласованного» фильтр получил из-за пропорциональности частотной характеристики спектру сигнала при условии некоррелируемости помехи. Фильтр эффективен при выделении слабых сигналов известной формы на фоне белого шума и применяется в случае высокого уровня последнего. Фильтр обнаружения широко применяется в методах потенциальных полей [Глазунов, 1992], в меньшей степени — в сейсморазведке[Никитин, 2014], в георадиолокации его использование широкого распространения не получило, здесь оптимальные алгоритмы представлены только деконволюцией[Владов, Судакова, 2016].

Рис. 1. Изменение волнового поля на радарограмме при переходе на участок с другим типом покрытия(красная пунктирная линия).



Характеристика фильтра обнаружения по форме соответствует полосовому неоптимальному фильтру, но его полоса пропускания адаптируется к изменяющейся от трассы к трассе форме сигнала. Форма сигнала после фильтрации утрачивается, результат обработки — симметричные относительно времени вступления импульсы, называемые сейчас вейвлетами (Рисунок 2). Компактность импульсов при этом несколько снижается. Основной проблемой для реализации оптимальной фильтрации является неизвестная и переменная



1 – сигнал, 2– исходная трасса, как сумма сигнала и интенсивного белого шума,
3 – результат фильтрации, 1а — спектр сигнала и частотная характеристика фильтра,
2а —спектр суммы, 3а— спектр профильтрованной трассы.

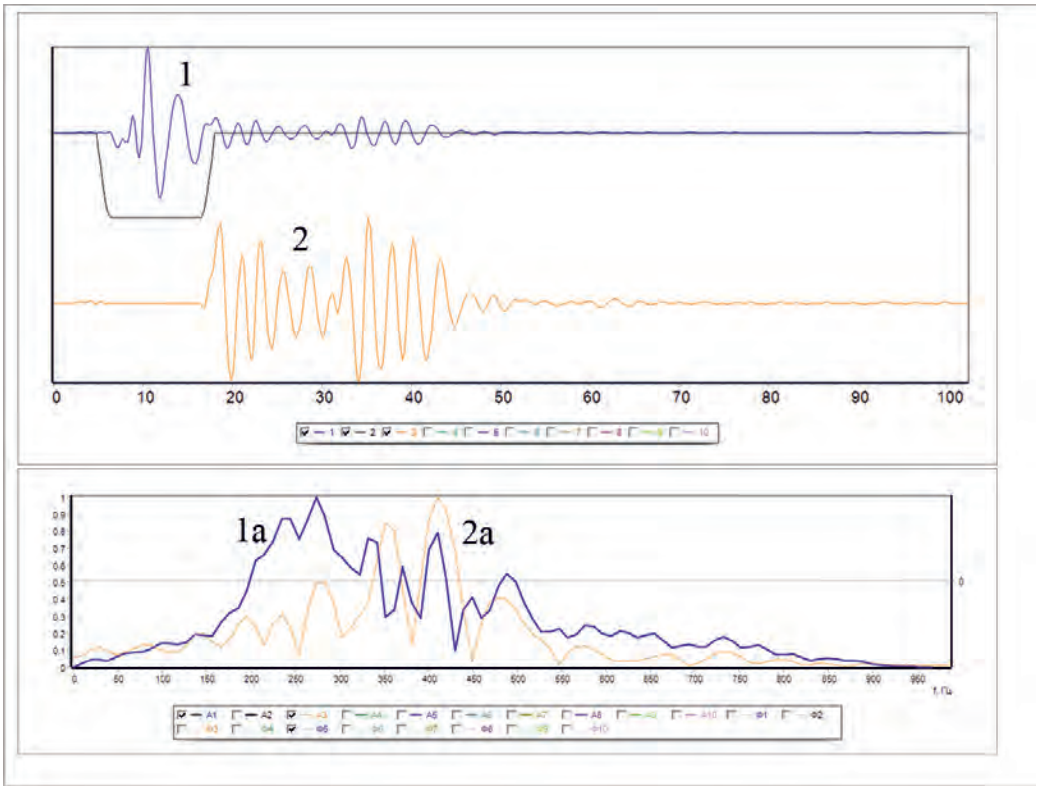
▲ *Рис. 2. Реализация согласованной фильтрации на примере модельных данных*

форма полезного сигнала [Романов, Иванов, 2024]. Определение её по исходным данным осложняется тем, что это возможно только для узкого класса сигналов (минимально– или нуль–фазовых) на основе значений автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция (АКФ) трассы, содержащий множество сигналов одинаковой формы, частично совпадает с АКФ отдельного сигнала. На основе простой связи амплитудных спектров АКФ и сигнала (Теорема Винера–Хинчина) отыскивается характеристика фильтра [Романов и др., 2020] обнаружения.

В статье излагается опыт практического применения рассмотренного подхода к данным георадиолокации.

Реализация фильтра обнаружения

Первой проблемой, возникающей при реализации оптимальной фильтрации данных георадиолокации, независимо от типа обработки, это доминирование сигнала прямого прохождения на радарограммах. При исключении прямой волны становится заметно, что спектр и АКФ оставшейся части радарограммы заметно отличаются от исходных. Поэтому расчёт АКФ для формирования частотной характеристики любого оптимального фильтра необходимо производить после подавления сигнала прямого прохождения. На рисунке 3 показан результат подавления сигнала прямого прохождения (АБ-400) умножением на прямоугольное окно с косинусным сглаживанием во временной и частотной областях. В результате исключения прямой волны форма спектра осложнилась, его ширина сократилась, а преобладающая частота увеличилась с 270 до 420 МГц, появилось множество обособленных пиков, что характерно для спектров суммы сигналов. Более низкочастотный характер необработанной трассы объясняется интерференционной природой

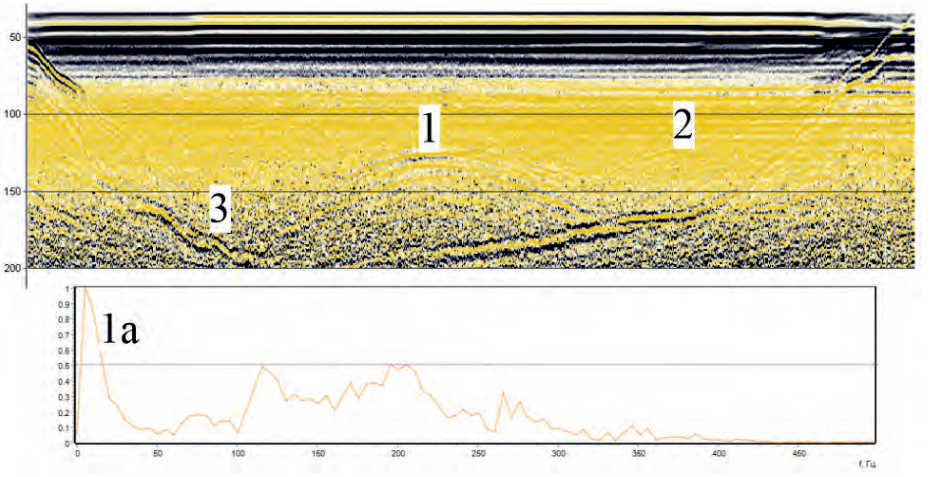


1 – исходная трасса полевой радарограммы, 2– результат исключения сигнала прямого прохождения, 1а — спектр исходной трассы, 2а — спектр обработанной трасы.

▲ *Рис. 3. Результат подавления сигнала прямого происхождения.*

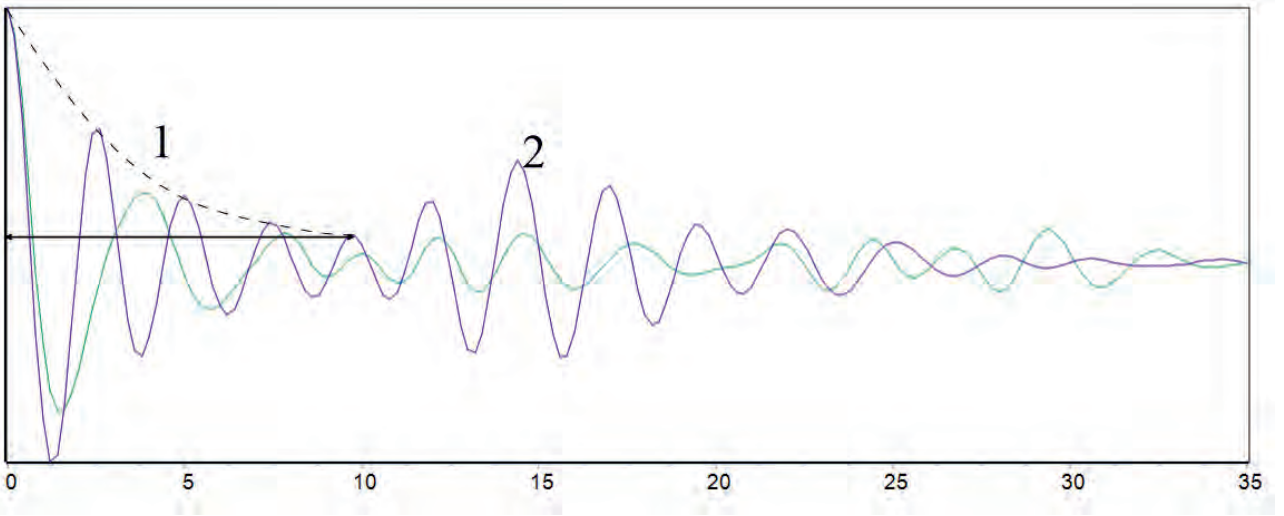
сигнала прямого прохождения, он складывается из колебаний прямых воздушной и грунтовой волн.

Во многих случаях, после подавления сигнала прямого прохождения проявлялся низкочастотный фон, затрудняющий выделение импульсов отражённых и дифрагированных волн. На радарограмме его колебания отражались как протяжённые зоны с сигналом одного знака(одноцветные), на спектрах трасс — как узкие низкочастотные пики с частотой 5–30 МГц(Рисунок 4). В такой ситуации после подавления сигнала прямого



сверху—радарограмма, снизу — спектр по одной из трасс; 1 – выступ дна, дифрактор, 2– поверхность дна, 1а — низкочастотный пик в амплитудном спектре;
Радар с АБ–150 МГц, исследование дна водоёма с открытой водной поверхности.

▲ *Рис. 4. Низкочастотный фон на радарограмме после подавления сигнала прямого прохождения.*



1 – АКФ исходной трассы, 2–АКФ обработанной трассы, пунктир — фрагмент огибающей АКФ, стрелки — АКФ одиночного импульса трассы. По горизонтали — сдвиг АКФ, нс.

▲ *Рис. 5. Оценка влияния подавления сигнала прямого прохождения на форму автокорреляционной функции.*

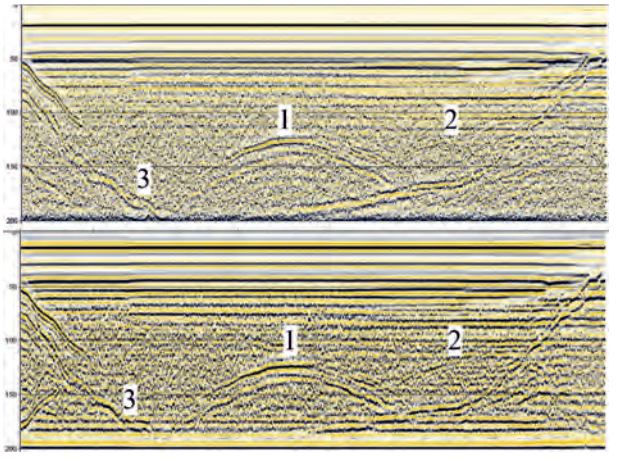
прохождения дополнительно применялась полосовая фильтрация.

На рисунке 5 сравниваются форма АКФ трассы радарограммы до и после подавления сигнала прямого прохождения. После обработки радиус корреляции уменьшился, а длина АКФ увеличилась. Вторичные разрастания АКФ связаны с присутствием на трассе нескольких импульсов близкой формы. После получения АКФ её полезная длина сокращалась до длительности одиночного импульса, что определялось по убывающему характеру огибающей (Рисунок 5). Исправление АКФ выполнялась умножением на прямоугольное окно.

Значения исправленной АКФ применялись для расчёта оператора фильтра обнаружения на основе прямого преобразования Фурье и последующего извлечения квадратного корня из действительных амплитуд гармоник. Импульсы на радарограммах при этом полагалась нуль-фазовыми. На рисунке 6 продемонстрированы результаты реализации подхода на примере обработки радарограммы, показанной на рисунке 4. Фильтр обнаружения позволил повысить надёжность прослеживания отражающей границы на фоне некоррелируемого шума. Отрицательным эффектом обработки стало увеличение длины сигнала и изменение его формы.

Выводы

Проведённые исследования показали возможность использования фильтра обнаружения для выделения слабых



сверху—исходная радарограмма, снизу — после применения фильтра

▲ обнаружения; 1 – выступ дна, дифрактор, 2– поверхность дна, 3 — граница в грунтах под дном, АБ–400 МГц, исследование дна водоёма с открытой водной поверхности

Рис. 6. Результаты применения фильтра обнаружения.

отражённых и дифрагированных волн на радарограммах на фоне некоррелируемого шума при условии предварительной обработки как самых данных георадиолокации, так и полученных по ним реализациям автокорреляционной функции. Дальнейшим направлением работы станет адаптация алгоритма к минимально–фазовой модели сигнала.

Литература

1. Глазунов В.В. Адаптивный фильтр обнаружения геофизических аномалий трубок взрыва // Записки Горного института. 1992. Т. 130. С. 78.

2. Никитин, А. А. Энергетическая фильтрация геофизических полей / А. А. Никитин // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 2-13. – EDN SHLXOB.

3. Владов, М.Л., Судакова, М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. М.: Геос, 2017. 240 с.Петров, А. В. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D и практические результаты / А. В. Петров, Г. В. Демура, С. В. Зиновкин // Недропользование XXI век. – 2017. – № 1(64). – С. 44-59. – EDN YIPRIR.

4. Романов, В. В. Опыт обратной фильтрации данных георадиолокации, полученных при исследовании автодорог / В. В. Романов, А. А. Иванов, А. А. Матюшенко // Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе : сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 16–22 октября 2020 года / Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. – Москва: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2020. – С. 25-29. – EDN NPYKKJ.

Романов, В. В. Опыт использования деконволюции в инженерной сейсморазведке / В. В. Романов, А. А. Иванов // Вестник РАЕН. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 20-24. – DOI 10.52531/1682-1696-2024-24-1-20-24. – EDN TTUQUU.

Подробнее об авторах

РОМАНОВ
Виктор Валерьевич
Доцент кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем факультета геологии и геофизики нефти и газа Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, к.т.н.

ЛАТЫШЕВ
Кирилл Алексеевич
студент, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе.

МАТЮШЕНКО
Анна Алексеевна
Старший преподаватель кафедры геофизики, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе.

КАУРКИН
Михаил Дмитриевич
Ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.т.н.