

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата
технических наук Матвеева Никиты Михайловича на тему:
«Технологии повышения устойчивости решения различных алгоритмов
деконволюции» по специальности 1.6.9. Геофизика

Деконволюция – один из основных этапов обработки сейсмических данных без применения, которого не обходится ни одно практическое исследование. Несмотря на то, что история применения деконволюции насчитывает не один десяток лет, постоянно повышающиеся требования к детальности и разрешающей способности сейсморазведки требуют создания новых алгоритмов, которые отвечают современному качеству исходных данных, максимально полно учитывают современные знания о факторах, влияющих на формирование сейсмической записи и особенностях строения среды, а также – максимально полно используют современные вычислительные возможности. Всё это определяет высокую **актуальность** диссертационного исследования.

Новизна работы определяется оригинальными авторскими разработками алгоритмов деконволюции в кепстральной области, а также – результатами сравнительного тестирования различных алгоритмов на синтетических и реальных данных. Это позволяет сформулировать практические рекомендации по использованию алгоритмов в геофизической практике. Результаты работы уже внедрены в практику работ, в частности – в ООО «Петротрейс», которое является одним из флагманов обработки данных сейсморазведки в нашей стране.

Защищаемые положения обоснованы результатами теоретических и экспериментальных исследований, приведённых в диссертации. Наибольшей новизной и значимостью обладает третье защищаемое положение, поскольку деконволюция с использованием кепстральных преобразований до настоящего момента мало распространена и опыт разработки и применения

соответствующих алгоритмов вносит существенный вклад в развитие отрасли обработки сейсмических данных.

Необходимо отдельно отметить необычную для кандидатской работы широту диссертационного исследования, в котором затронуты самые разные аспекты деконволюции – от теоретических основ до алгоритмической реализации и практического использования. При этом все аспекты проработаны весьма глубоко.

Обратимся к анализу текста диссертации. Обзор истории развития методов деконволюции, которому посвящена Глава 1 диссертации, отличается значительная глубина: автор не ограничивается рассмотрением работ последних десятилетий, но прослеживает историю метода вплоть до возникновения самой идеи в середине XX века. Здесь стоит отметить, что идея и алгоритмы оптимальной фильтрации впервые были сформулированы не Н.Винером, а А.Н. Колмогоровым в 1941 году и соответствующий метод оптимальной фильтрации следует (и принято, причем как в отечественной, так и в зарубежной литературе) называть методом Колмогорова-Винера. В целом обзор является одним из наиболее полных исследований истории вопроса, читать его весьма интересно. Вместе с тем, вызывает удивление некоторая странность компоновки обзора: собственно методам деконволюции посвящён раздел 1.1, однако в разделе 1.3, посвящённом кепстральному анализу, автор вновь возвращается к таким базовым понятиям как свёрточная модель трассы и подробно перечисляет обзорные работы, посвящённые деконволюции.

Глава 2 содержит весьма подробный обзор теоретических основ используемых методов деконволюции. Детальность и объём изложения впечатляют, как и число использованных источников. Последовательно излагаются теория классических методов, основанных на фильтре Колмогорова-Винера, методы поверхностно-согласованной деконволюции и методы, основанные на принципах гомоморфной обработки сигналов – кепстральном анализе. Вместе с тем, к главе имеется ряд замечаний.

Так, в числе допущений, используемых в алгоритмах деконволюции указано, что «компонента случайного шума является нулевой». В действительности это не так. Наличие аддитивного случайного шума составляет основу методов оптимальной фильтрации, на которых построена деконволюция. Правильным условием является некоррелированность шума и полезного сигнала (либо информация об их ВКФ). Также не является необходимым и условие, что импульс является минимально-фазовым. Для минимально-фазовых импульсов многие алгоритмы действительно работают более устойчиво, но, строго говоря, деконволюция возможна для импульсов произвольной формы. Предположение 6 сформулировано некорректно: утверждается, что если последовательность коэффициентов отражения представляет собой случайный процесс, то её АКФ будет «похожа на АКФ белого шума», т.е. на δ -функцию. В действительности, АКФ случайного процесса зависит от свойств этого процесса и не является δ -функцией.

Последняя неточность логически приводит к некорректному толкованию постановки задачи предсказывающей деконволюции: использование «шага предсказания» для формирования правой части системы (5) фактически соответствует именно оценке АКФ той самой импульсной последовательности отражений по АКФ сейсмической трассы.

Утверждается, что оптимизация в среднеквадратическом (по норме L_2) применима при обширном наборе условий: *«стационарность, минимальная фаза сигнатуры источника, гауссовский шум и импульсная характеристика среды»*. В действительности оптимизация в среднеквадратическом порождает максимально правдоподобную (а значит, асимптотически несмещённую и состоятельную) оценку при единственном условии на гауссовский характер аддитивного шума.

Что касается минимизации по норме L_1 , то она действительно довольно широко применяется в современной практике, поскольку в большей степени способствует снижению числа значимо ненулевых элементов вектора решения. Если вектор решения представляет собой коэффициенты разложения

по некоторому базису, то такое решение ведёт к снижению размерности, что, при отсутствии иной априорной информации, отвечает принципу Оккама. Что касается использования нормы L_1 для решения конкретной задачи определения коэффициентов оптимального фильтра, то её оптимальность зависит от свойств шума. И если, как это впоследствии демонстрируется на модельных и реальных данных, такой подход оказывается предпочтительным, то это означает, что свойства шума существенно отличны от нормального (Гауссовского). Следовало бы идти обратным путём: исследовать свойства шума в оценке энергетического спектра и на этой основе предлагать способ (норму) оптимизации.

Наибольший интерес представляет раздел, посвящённый кепстральному анализу. Этот материал до настоящего времени плохо представлен и систематизирован, особенно – в русскоязычной литературе и подготовка весьма полного обзора по данной теме – несомненная заслуга автора. Здесь уместно указать, что идея кепстрального преобразования также восходит к работам А.Н. Колмогорова, что, впрочем, не так широко известно, как его роль в создании методов оптимальной фильтрации.

В целом, недостатком Главы 2 является определённая непоследовательность изложения: определения часто следуют за использованием соответствующих понятий, а математически строгие рассуждения (например, общее определение гомеоморфизма) соседствуют с сугубо инженерными нестрогими рассуждениями. Очевидно, что основная часть излагаемого в Главе 2 материала носит обзорный характер и почерпнута из литературных источников, однако манера цитирования (большое количество источников в конце раздела) затрудняет понимание и возможность обратиться к источникам. Повторюсь, материал, представленный в Главе 2, имеет большую ценность. Однако работа существенно выиграла бы, если бы при написании данного раздела использовалась классическая компоновка теоретических работ – с определениями, утверждениями, доказательствами (при необходимости) и точным цитированием конкретных источников.

В качестве технического замечания следует отметить определённую небрежность оформления текста как диссертации, так и автореферата. В частности, везде по тексту используются обозначения L_1 , L_2 для соответствующих норм. Существуют общепринятые обозначения с использованием курсива и нижних индексов: L_1 , L_2 . Такая небрежность снижает общее впечатление от диссертации и далее распространяется и на не вполне корректное использование по тексту математических терминов.

Глава 3 посвящена опробованию различных алгоритмов поверхностно-согласованной деконволюции на модельных и полевых данных. Из приведённого здесь описания «робастного» алгоритма становится ясно, что решение ищется в спектральной области. Поэтому, оптимизация в норме L_1 будет способствовать разреженности спектра, а значит – усиливать квазипериодичность решения, определяемую наличием отражений. Из описания непонятно в какой области – временной или спектральной – ищется решение для коэффициентов оптимального фильтра в «стандартном» подходе. Если это делается во временной области, т.е. по результатам оценки АКФ, то свойства шума будут существенно отличны от таковых в спектральной области. Обнаруженные в работе различия в результатах работы алгоритмов в зависимости от числа зашумлённых трасс могут, в этих условиях, определяться именно отличиями свойств шума в различных областях, равно как и особенностями программной реализации. Это затрудняет понимание причин обнаруженных различий в качестве результатов деконволюции.

Основной проблемой, общей для современной сейсморазведки, остаётся игнорирование статистических свойств шума. Указано, что использовался «белый» шум. Таким образом, задана лишь АКФ соответствующего случайного процесса – δ -функция. Однако такая характеристика существенно неполна. Далее анализируется окрашенный (низкочастотный) шум, однако его статистические свойства по-прежнему не исследуются. Между тем, используемые алгоритмы деконволюции основаны на математических методах анализа временных рядов, для которых именно статистические

свойства шума являются определяющими. Здесь заключена существенная проблема и пространство для дальнейшего развития теории и практики обработки сейсмических данных.

Ключевой для диссертации является Глава 4, которая описывает оригинальные авторские алгоритмы деконволюции, основанные на кепстральном анализе. Здесь автор вступает в малоисследованную (по крайней мере, в приложении к сейсморазведке) область и реализует соответствующие алгоритмы, а также проводит их исследование полностью самостоятельно. Исследование, таким образом, обладает весомой научной новизной.

В качестве инструмента исследования выбран сравнительный анализ различных алгоритмов. Впечатляет объём проведённых исследований. Основным достижением работы, по-видимому, следует считать формулировку и реализацию нового гибридного алгоритма, сочетающего оценку импульса в кепстральной области и её дальнейшее использование для построения обратного фильтра. Даже одно это решение выглядит достаточным для защиты диссертации. Не слишком часто (к сожалению) диссертационные работы приводят к созданию новых практически работающих алгоритмов.

В качестве замечания можно указать, что вывод о предпочтительности использования действительного кепстра, сравнительно с комплексным сделан на основании визуального анализа и является спорным.

Общим важнейшим результатом диссертационного исследования стали конкретные алгоритмы и подтверждённые результатами опробования на модельных и полевых данных практические рекомендации по использованию различных алгоритмов деконволюции, включая выбор их параметров. Эти результаты, несомненно, будут востребованы в практике работы сейсморазведчиков-обработчиков и, тем самым, вносят существенный вклад в развитие отрасли.

Указанные в отзыве замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом

имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9. Геофизика (технические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено, согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Матвеев Никита Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, академик РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ТИХОЦКИЙ Сергей Андреевич

08.10.2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 766-26-56, e-mail: sat@ifz.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Адрес места работы: 123242 г. Москва, ул. Большая Грузинская, дом 10, стр. 1.

Тел.: +7 766-26-56; E-mail: direction@ifz.ru

Подпись сотрудника _____

ИФЗ РАН удостоверяю:

руководитель/кадровый работник _____