

ПсевдоВСП и задачи волновой инверсии

Д.Б. Фиников

к.т.н., директор департамента разработки алгоритмического и программного обеспечения¹
d.finikov@yandex-terra.ru

А.В. Шалашников

ведущий программист¹
a.shalashnikov@yandex-terra.ru

¹Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек»),
 Москва, Россия

Предлагается способ подготовки данных для решения задач волновой инверсии и получения эталонных результатов миграции в выбранных точках площади. Способ заключается в пересчёте волнового поля 3D данных наземной сейсморазведки в данные 3D псевдоВСП. Способ предполагается использовать для определения параметров упругости среды (обратной динамической задачи сейсморазведки) и параметров неупругого частотно-зависимого поглощения в отдельных вертикальных выборках сред. Такая обработка опирается на предварительно отстроенную макромодель среды (решение обратной кинематической задачи).

Материалы и методы

Метод моделирования волновых полей и метод трансформации волновых полей.

Ключевые слова

система обработки сейсмических данных, глубинно-скоростная модель, прямые и обратные задачи, глубинная миграция

Когда речь идёт об инверсионных задачах, то вопрос первостепенной важности – по каким данным эти задачи предполагается решать. Когда-то вопрос о том, по каким данным следует производить АВО-анализ, был дискуссионным. Можно вспомнить броское название статьи 2000-го года специалистов российского подразделения компании «Paradigm» «Миграция и АВО: соседство или марьяж» [1].

Сейчас принято анализировать амплитуды по мигрированным данным. Это при том, что ни для кого из специалистов в сейсморазведке не является секретом тот факт, что миграция не обеспечивает восстановление «истинных амплитуд», даже в идеально известной глубинно-скоростной модели среды. Понятие миграции в «истинных амплитудах» всего лишь означает, что в ходе преобразования предпринимаются специальные меры для учета геометрического расхождения. Это касается всех реализаций процедур миграции.

Причин принципиальной невозможности амплитуд коэффициентов отражений в ходе миграции может быть названо множество, перечислим главные.

Первая, но не самая важная из причин – численная необратимость оператора прямого распространения волн. Со времён трактовок Берхаутом и Ван Вулффтеном Палхе [2] миграции, как пространственной деконволюции – этот факт общеизвестен, хотя он и намного ранее исследовался в работах С. Васильева [3]. В последнее время, эту тему поднимает в своих публикациях М.С. Денисов [4].

Вторая и более существенная из причин заключается в том, что когда выводятся формулы миграционных преобразований, они чаще всего пишутся в интегралах, без учета конкретной дискретности системы наблюдений и ограниченности объема выборок входных данных. Конечно, хорошие алгоритмы и программы созданы так, чтобы по возможности учесть эффекты, связанные с особенностями системы наблюдений, но эти возможности весьма ограничены.

Еще одна немаловажная причина обусловлена тем, что интерпретаторов интересуется не только интегральная характеристика коэффициента отражения, но и его зависимость от углов падения/отражения. В интегральных миграционных преобразованиях такое разделение обеспечивают соответствующей заменой переменных и разделением общего интеграла на соответствующие подинтегралы. Здесь возникают сложности с учетом соответствующих якобианов преобразований, зависящих от модели среды, и неравномерности накопленных подинтегралов. Конечно, для преодоления этих сложностей тоже предпринимаются специальные меры, но они рассчитаны на сравнительно простые модели сред и достаточно плотные и регулярные системы наблюдений. За скобками остаются предварительные методы регуляризации данных и последующие процедуры снятия т.н.

«футпринтов», которые привносят свои искажения динамики.

Между тем, если иметь в виду, что глубинно-скоростная модель задана (а иначе задача миграции и не рассматривается), то принципиально задача решается. Для этого надо, выделив на мигрированных данных интересующий объект, решить прямую задачу, задав отражательные характеристики этого объекта известными. После этого следует произвести миграцию синтетических данных в заданной геометрии наблюдений и, оценив искажения соответствующих характеристик, учесть их при интерпретации. Этот способ, который мы называем методом эталонных сейсмограмм, является самым естественным приёмом, и, с определёнными оговорками, пригоден для коррекции любых методов миграции. Поскольку миграционное преобразование является линейным оператором, не зависящим от данных, а зависящим только от модели среды – этот способ вполне обоснован. Так выглядит общая концепция обработки с сохранением амплитуд, которая представляется вполне очевидной. Эта тема неоднократно поднималась нами на конференциях по вопросам обработки данных сейсморазведки [5, 6, 7, 8].

Таким образом, сейчас мы можем сказать, что амплитуды после миграции анализировать можно, но это требует специальной обработки данных.

Однако аналогичный вопрос встаёт и тогда, когда речь заходит о волновой инверсии. Также общим местом для всякого рода инверсий стало применение их по мигрированным данным. В стороне остаются методы волновой инверсии, берущие свое начало с работ Тарантолы [9], в которых делается попытка подобрать параметры среды, непосредственно отображающиеся в зарегистрированную волновую картину (которая, конечно, тоже является результатом обработки). Надо сказать, что это направление пока далеко от практических приложений. Между тем, немигрированные данные привлекательны тем, что форма волны в них не искажена нестационарным фильтрующим воздействием оператора миграции. Трудности волновой инверсии по немигрированным данным обусловлены (оставаясь в стороне технические и вычислительные аспекты) сложностью волновой картины, сложностью идентификации отражений в интерференционной записи и невозможностью переложить эти проблемы на решение плохо обусловленных систем уравнений.

В методе ВСП эти задачи поставлены гораздо лучше благодаря самой системе наблюдений. В обработке данных ВСП есть множество непростых задач как общих с наземной сейсмикой, так и специфических. Однако, когда решены задачи разделения полей на падающие и восходящие, когда подавлены многочисленные (гораздо более интенсивные, нежели в наземных данных) многократные отражённые волны, волновая картина данных ВСП существенно проще и представляет собой гораздо более

благодарный объект для решения обратных динамических задач. Можно сказать, что эти данные уже наполовину отмигрированы, но несут в себе всю информацию о коэффициентах отражений в скважине и её окрестности, отличаются выдержанной формой сигнала и более простой волновой картиной. Фактически, если в скважине зарегистрированы волны от многих пунктов взрывов, то среди годографов отраженных волн всегда присутствует и годограф прямой волны. Этот годограф гораздо проще интерпретировать и, опираясь на него, легче идентифицировать и остальные отраженные волны.

Оказывается, можно и по наземным данным, опираясь на известную макромоделю среды, получить волновое поле, соответствующее такой системе наблюдений. В процессе послойной миграции получают поле отраженных волн с приемниками, пересчитанными в любые внутренние точки среды. Ответ миграции представляет собой коэффициент корреляции прямой волны, рассчитанной в заданной модели среды на это волновое поле. Если упорядочить эти точки по вертикали, то в произведении фигурируют модельная прямая волна и данные ВСП, насчитанные из реальных наблюдений. В формировании изображения фигурирует лишь небольшая окрестность прямой волны. Все остальные волны, которые получаются по ходу преобразования, в ответе миграции не участвуют. Расширение области накопления ответа миграции кажется очень полезным и обоснованным приемом улучшения изображения. Однако практически его невозможно реализовать для всех точек среды из-за колоссальных вычислительных нагрузок. Кроме того, не хочется этот процесс полностью автоматизировать, так как интерпретация данных ВСП — процесс содержательный и требующий разумного

интерактива. А вот в отдельных точках площади (количество их может быть и очень большим и выбираться в соответствии с геологическими задачами) это возможно.

По сути, мы получаем здесь своеобразные развертки изображения в выбранных глубинных точках. Это не сейсмограммы общей точки изображения, которые строят в миграции, а волновые поля, несущие в себе всю информацию, которая была в исходных записях отраженных волн. По этим данным мы имеем все основания пользоваться борновским приближением (свёрточной моделью однократно-отраженных волн) для расширения спектра в область низких и высоких частот. В этих данных нет присутствующих миграции (и неустранимых!) искажений формы сигнала, связанных с его временной протяженностью («растяжки»), которые обусловлены тем, что одни и те же фрагменты импульса должны «по построению» попадать в ответы миграции для разных глубин). В данных содержится вся информация о зависимости как амплитуд, так и формы волны от углов падения, отражения. Думается, что у специалистов по обработке и интерпретации данных 3D-ВСП накоплен немалый опыт решения таких задач. Здесь этот опыт должен быть востребован.

Конечно, обсуждаемый способ обеспечивает гораздо более бедные данные, нежели настоящие ВСП — сейсмограммы. Можно обсуждать многокомпонентную модификацию метода, но, надо полагать, это преждевременно. Однако и как дополнение к традиционному методу ВСП при его комплексировании с наземной сейсмикой, обсуждаемая методика представляет очевидный интерес.

С точки зрения интерпретатора, инверсия волновых полей, зарегистрированных наземной сейсморазведкой, это

интерполяция между скважинами. Скважин обычно недостаточно. Мы предлагаем способ, позволяющий в значительной степени восполнить недостаточность таких наблюдений более глубокой обработкой обычных данных. Обработкой, которую невозможно провести по всей площади, но которая может дать достаточно данных для последующей обычной инверсионной «интерполяции».

При этом по-прежнему важной остается обработка с правильными амплитудами и подготовку псевдоВСП данных целесообразно сопровождать моделированием и «эталонированием» волновых полей.

Традиционные AVO и AVA анализы также можно и целесообразно проводить по данным псевдоВСП. Избыточность измерений позволяет изучать параметры описания зависимостей амплитуд в самых общих моделях.

На рис. 1 показан фрагмент мигрированного разреза и две сейсмограммы ВСП для двух удалений источника от скважины. Это реальные данные из Западно-Сибирского региона.

Такие сейсмограммы получают по множеству удалений и азимутов. Можно видеть, что они выглядят как данные ВСП очень хорошего качества, очищенные от всех падающих волн и многократных отражений. Правда, для ВСП характерен более широкий диапазон частот, нежели для наземной сейсмике. Надо полагать, что и для решения деконволюционных задач, и для идентификации параметров поглощения — здесь тоже немалая область приложений.

Итоги

Предложен способ подготовки данных для решения задач волновой инверсии и получения эталонных результатов миграции в выбранных точках площади.

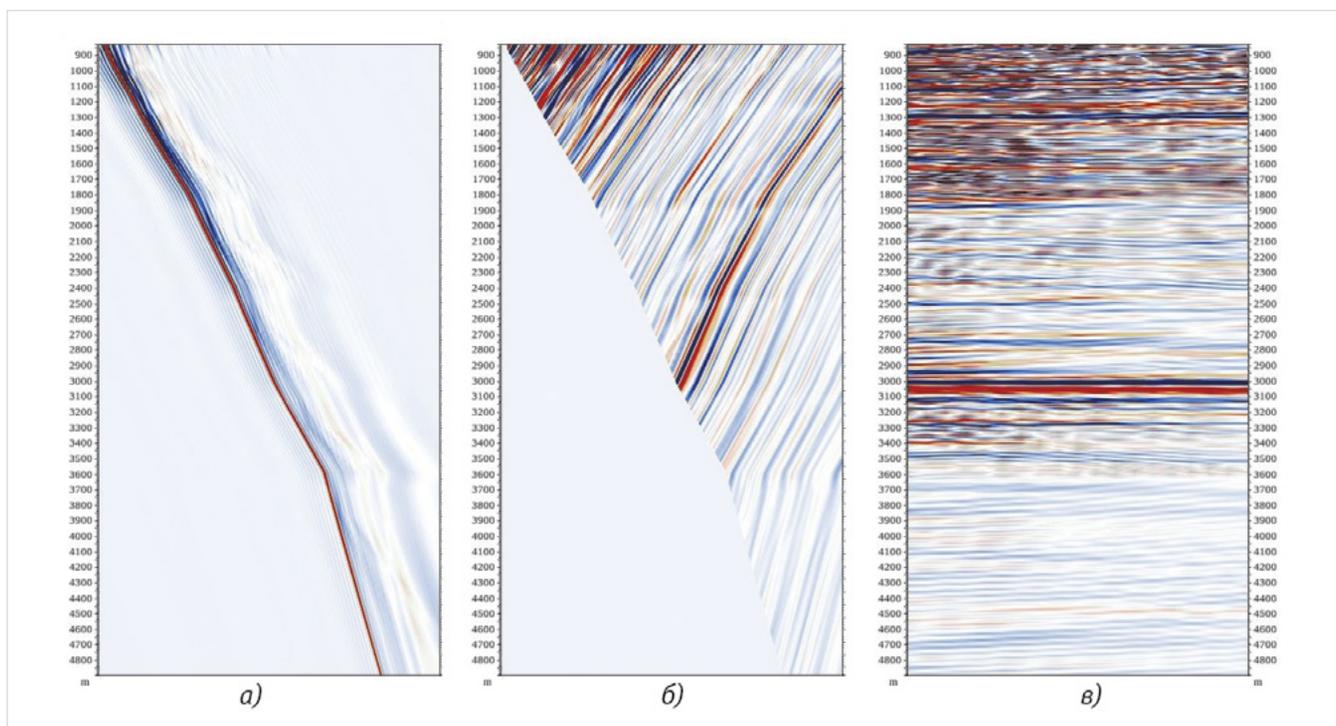


Рис. 1 — Пример данных способа псевдоВСП. Одно сечение трехмерной сейсмограммы на удалении источника от псевдоскважины на 600 м. Скважина в диапазоне глубин 830–4900 м, вынос скважины — 600 м, рассматриваемый диапазон времён — 530 м – 1750 мс, частоты — до 75 Hz, диапазон мигрированного разреза одного ОПВ +/- 250 м от скважины. А) прямая волна, рассчитанная в пластовой модели среды, в которой производилась послойная миграция. Б) Сечение трёхмерной сейсмограммы псевдоВСП. В) Фрагмент мигрированной сейсмограммы ОПВ в окрестности (+/-) 200 м от скважины

Выводы

Существенно упрощается постановка и решение задач волновой инверсии.

Список используемой литературы

1. Баранский Н.Л., Старобинец М.Е., Королев Е.К., Иноземцев А.Н., Козлов Е.А. Миграция и AVO: соседство или марьяж // ЕАГО. Геофизика. 2000. Вып. 2. С. 22–26.
2. Berkhout, A. J., D. W. Van Wulfften Palthe. Migration in terms of spatial deconvolution // Geophys. Prospect. 1979. № 271. pp. 261–291.
3. Васильев С.А. Некоторые вопросы теории продолжения волнового поля в сторону источника // Физика Земли. 1973. №3. С. 35–47.
4. Денисов М.С. О возможности построения глубинного изображения среды в истинных амплитудах // Технологии сейсморазведки. 2014. №2. С. 42–50.
5. Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Силаенков О.А., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Возможности расширения класса пластовых моделей сред при решении обратной кинематической задачи по отраженным продольным волнам. 11-й семинар «Синтез современных геотехнологий». Москва, 12 марта 2014.
6. Каплан С.А., Кузнецов И.К., Лангман С.Л., Силаенков О.А., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. В.М. Глоговский и его Прикладная теория определения скоростных и глубинных параметров среды. Конференция «Сейсмические технологии-2015». Москва, 13–15 апреля 2015.
7. Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Трансформация волновых полей: миграция, погружение, моделирование. Конференция «Тюмень-2013. Новые геотехнологии для старых провинций». Тюмень, 25–29 марта 2013.
8. Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Способ трансформации волновых полей в пластовой модели среды. 1-ая международная научно-практическая конференция «Информационные технологии для наук о Земле 2012». Дубна, 07–09 декабря 2012.
9. Tarantola A. Theoretical background for the inversion of seismic waveforms, including elasticity and attenuation. Pure and Applied Geophysics. 1988. issue. 1–2. pp. 365–399.

ENGLISH

GEOPHYSICS

PseudoVSP and objectives of the wave inversion

UDC 550.3

Authors:

Dmitry B. Finikov — Ph.D., Head of R&D Department¹; d.finikov@yandex-terra.ru

Andrey V. Shalashnikov — leading software developer¹; a.shalashnikov@yandex-terra.ru

¹Yandex.Terra (Seismotech, Ltd), Moscow, Russian Federation

Abstract

The authors propose a method of data preparation for wave inversion task solution and obtaining of reference results of migration in selected area points. The method consists in the conversion of the wave field data from land 3D seismic acquisition data into 3D pseudoVSP. The method will be used in order to determine the parameters of elasticity of the medium (the inverse dynamic problem of seismic acquisition data) and inelastic parameters of frequency-dependent absorption in separate vertical

samples of the medium. This processing is based on a pre-built macro-model of the medium (the solution of inverse kinematic problem).

Materials and methods

Method of wave fields method modeling and wave fields transformation.

Results

A method of data preparation for wave inversion task solution and obtaining of

reference results of migration in selected area points is proposed.

Conclusions

Essentially simplifies the formulation and solution of wave inversion tasks.

Keywords

system for seismic data processing, depth-velocity model, direct and inverse tasks, depth migration

References

1. Baranskiy N.L., Starobinets M.E., Korolev E.K., Inozemtsev A.N., Kozlov E.A. *Migratsiya i AVO: sosedstvo ili mar'yazh* [Migration and AVO: neighborhood or marriage]. *EAGO. Geofizika*, 2000, Vol. 2, pp. 22–26.
2. Berkhout, A. J., D. W. Van Wulfften Palthe. Migration in terms of spatial deconvolution // *Geophys. Prospect*. 1979, issue 271, pp. 261–291.
3. Vasil'ev S.A. *Nekotorye voprosy teorii prodolzheniya volnovogo polya v storonu istochnika* [Some problems of the theory of wave field continuation in the direction of a source]. *Physics of the Solid Earth*, 1973, issue 3, pp. 35–47.
4. Denisov M.S. *O vozmozhnosti postroeniya glubinnogo izobrazheniya sredi v istinnykh amplitudakh* [Feasibility of true-amplitude depth imaging]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2014, issue 2, pp. 42–50.
5. Anisimov R.G., Langman C.L., Silaenkov O.A., Finikov D.B., Shalashnikov A.V. *Vozmozhnosti rasshireniya klassa plastovykh modeley sred pri reshenii obratnoy kinematicheskoy zadachi po otrazhennym prodol'nym volnam* [Possible extensions of the class of reservoir models of environments for the inverse kinematic problem solving for compressional reflections]. The 11th seminar on "Synthesis of modern Geotechnologies", Moscow, 12 March 2014.
6. Kaplan S.A., Kuznetsov I.K., Langman S.L., Silaenkov O.A., Finikov D.B., Shalashnikov A.V. *V.M. Glogovskiy i ego Prikladnaya teoriya opredeleniya skorostnykh i glubinnyykh parametrov sredi* [V.M. Glogovskiy and his Applied theory of determination of velocity and depth parameters of the environment]. Conference "Seismic technology-2015", Moscow, 13–15 April 2015.
7. Finikov D.B., Shalashnikov A.V. *Transformatsiya volnovykh poley: migratsiya, pogruzhenie, modelirovanie* [Transformation of wave fields: migration, immersion, simulation]. Conference "Tyumen-2013. New Geotechnology for the old provinces", Tyumen, 25–29 March 2013.
8. Finikov D.B., Shalashnikov A.V. *Sposob transformatsii volnovykh poley v plastovoy modeli sredi* [Method of wave fields transformation into layered environment model]. 1st international scientific-practical conference "Information technologies for the Earth Sciences 2012", Dubna, 07–09 December 2012.
9. Tarantola A. Theoretical background for the inversion of seismic waveforms, including elasticity and attenuation. *Pure and Applied Geophysics*. 1988, issue 1–2, pp. 365–399.