



ГДЕ ЖИВУТ ДИФРАКТОРЫ?

И всё же точечные дифракторы существуют! Даже если среда однородна. Но областью их существования является наше сознание или, скорее, воображение, а не изучаемые нами горные породы.

**ГЮЙГЕНС, ТЫ НЕ ПРАВ?
(или КАК НЕ СЛЕДУЕТ ПОЯСНЯТЬ СЕЙСМИЧЕСКУЮ
МИГРАЦИЮ)**

Вторичные точечные источники, действующие независимо друг от друга и возбуждаемые фронтом проходящей "запальной" волны, являются удобной и наглядной абстракцией, которую мы можем привлекать (а можем и не привлекать) с целью анализа процесса распространения акустических волн. При этом крайне наивно полагать, что за этой абстракцией стоит какая-либо физическая реальность, в особенности если речь идёт о процессе распространения волны в однородной среде.

Если сформулировать приведённое утверждение иначе, то можно дать следующую интерпретацию принципу Гюйгенса. Пусть мы знаем положение фронта волны в какой-либо момент времени. Введём базис: систему функций, обладающих определёнными нужными нам свойствами. Разложим фронт волны по этому базису, т. е. представим его в виде суперпозиции базисных функций. Процесс распространения акустической волны в среде обычно описывается действием линейного оператора. Таким образом, действие оператора на фронт волны тождественно его действию на каждый элемент разложения (на каждую базисную функцию) и последующему суммированию результатов преобразования. Это является следствием линейности оператора.

Пусть, например, мы хорошо умеем решать задачу на распространение волны, вызванной точечным источником. Тогда выберем базис, составленный из "вторичных точечных источников", решим прямую задачу для каждого из них, сложим результаты, и получим искомое

решение: новое положение фронта волны. Здесь нам не потребовалось приписывать нашим базисным функциям какой-либо геофизический смысл. С тем же успехом, если мы хорошо умеем решать прямую задачу на распространение плоской волны через заданную среду, то разложим фронт "запальной" волны по базису плоских волн, применим линейный оператор преобразования к каждой плоской волне, а затем просуммируем результаты. Получим тот же самый фронт, что и в предыдущем случае, т. е. при использовании принципа Гюйгенса. При изучении распространения сферических волн в неоднородных средах, как правило, прибегают именно к их представлению в виде набора плоских волн (такое разложение описывается интегралом Вейля [1, 3]) и решают задачу для каждой плоской волны. Понятно, что никакой физической реальности искать за плоскими волнами не приходится, это опять-таки лишь удобный инструмент (т. е. мы умеем хорошо работать только с такими волнами), математическая абстракция. И такое преобразование мы применяем на практике не менее часто, чем разложение в соответствии с принципом Гюйгенса. Изложенная схема есть обработка на основе преобразования Радона, при этом вторичные источники сферических волн, так же как и вторичные источники плоских волн, существуют только в нашем воображении, но не в реальной среде. Никто всерьёз не возьмётся утверждать, что среда может быть представлена в виде бесконечного числа источников, излучающих вторичные плоские волны. С таким же успехом можно в качестве базиса применить параболы, гиперболы и другие функции.

Ситуация аналогична той, с которой мы имеем дело при разработке одноканальных алгоритмов. Пусть требуется осуществить линейное преобразование сейсмической трассы. Тогда может оказаться удобным сперва представить её в виде суперпозиции "простых" функций, например, комплексных экспонент. Базис, сформированный из комплексных экспонент, есть базис Фурье. Обработка в области Фурье-спектров может обладать ря-

дом преимуществ (среди них компактность и наглядность), по сравнению с обработкой в области времени, а действие линейного оператора, описываемого во временной области процедурой свёртки, может быть рассмотрено отдельно для каждой гармоники. После обработки, применив обратное преобразование Фурье, приходим к тому же результату, который был бы получен во временной области.

Когда-то в радиотехнике велись оживлённые дискуссии, являются ли гармоники (комплексные экспоненты базиса Фурье) реальными или воображаемыми. Некоторые горячие головы утверждали, что гармоники “реально присутствуют” в сигнале. Ставились опыты (окончившиеся неудачей) по выделению из сигнала изолированной гармоники. В конце концов восторжествовало мнение, что представление сигнала в виде суперпозиции базисных функций не более чем математическая абстракция [14]. С таким же успехом можно представить этот же сигнал (или сейсмическую трассу) в виде совокупности полиномов, функций Уолша, Хаара и т. п.

Теперь обратимся к причинам, по которым в “технологичной” сейсморазведке (к обсуждению этого термина, используемого Г. И. Петрашнем и А. Г. Рудаковым, мы приступим ниже) распространилось представление о среде как о совокупности вторичных точечных источников, т. е. к вопросу о вульгарном понимании принципа Гюйгенса, которое так убедительно и эмоционально критикуют Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков.

Изобретённый Ю. В. Тимошиным метод D -преобразования был им “нащупан” интуитивно. Алгоритм “работал” и обеспечивал преобразование реальных времён вступления сейсмических волн в “вертикальные” времена, что позволяло в некотором приближении получать “изображение” среды. Впоследствии, желая дать теоретическое обоснование процедуре, Ю. В. Тимошин обратился к принципу Гюйгенса, представляя среду в виде совокупности вторичных точечных источников, а наблюдаемое волновое поле как совокупность “дифрагированных волн”, т. е. прямых волн, вызванных этими источниками в результате воздействия фронта проходящей “запальной” волны [11]. Не знаю, насколько сам Ю. В. Тимошин верил в корректность такой модели среды (судя по всему, всерьёз он её не принимал, по крайней мере, вскоре D -преобразованию стало придаваться иное теоретическое обоснование - “Импульсная сейсмическая голография” [12]). Однако под его влиянием многие геофизики стали именно так представлять себе реальную среду, а вульгарно понимаемый принцип Гюйгенса (не как математически удобная абстракция, а как геофизически обоснованная модель среды) лишь способствовал этому. Простота и наглядность такой модели, помноженная на “наукообразие”, обеспечиваемое именем Гюйгенса, и на реальные и неоспоримые успехи D -преобразования, способствовали массовому укоренению этих взглядов.

В то же время для глубоко понимающих смысл задачи учёных некорректное теоретическое обоснование ставило под сомнение сам алгоритм D -преобразования. По свидетельству С. В. Гольдина [4], на одном из семинаров Г. И. Петрашень, подняв обе руки вверх, восклик-

нул: “Это преобразование никак не должно работать, но почему-то оно работает!”. Как мы видим из статьи Г. И. Петрашня и А. Г. Рудакова, представителями различных направлений (можно их назвать технологичной и классической сейсморазведкой) общий язык пока не найден, об этом свидетельствует очередная попытка (может быть, уже запоздалая) дискуссии.

Исследователь, настроенный скептически, может не согласиться с предложенным выше отношением к вторичным источникам Гюйгенса как к математической абстракции на основании того, что однородность не является абсолютным параметром вещества. Действительно, рассмотрев достаточно малый его объём, мы неизбежно увидим неоднородность строения. В конце концов, даже самый однородный материал состоит из молекул. Но могут ли молекулы быть точечными дифракторами и источниками вторичных акустических волн? Разумеется, нет*. Для того, чтобы пользоваться такими понятиями как “однородность” или “неоднородность”, необходимо задать “масштаб” задачи: характерный объём. И если бы размер характерного объёма был совершенно произволен, то бессмысленно было бы говорить об однородности вещества. В каждой конкретной задаче имеется некоторый размер, лежащий в основе масштаба измерений. В случае распространения акустических волн за такой размер “по порядку величины” можно условно принять, например, длину волны гармоники, доминирующей в спектре сейсмического импульса. Среда однородна, если средние свойства элементарных объёмов не зависят от их расположения. С другой стороны, среда может содержать точечные вкрапления, на которых действительно будут наблюдаться эффекты дифракции, но их размер должен быть сопоставим с масштабом характерного объёма.

Однако здесь читатель может возразить, сославшись на так называемые дискретные модели среды, известные, в том числе, и в сейсмических приложениях. Такую модель использовал, например, Ю. В. Ризниченко [10], и именно она больше всего “похожа” на представление среды в виде совокупности точечных дифракторов, хотя на самом деле, как мы это увидим, сходство ограничивается только названием. Здесь есть ряд принципиально важных особенностей, на которые стоит обратить внимание.

Дело в том, что все дискретные модели вовсе не представляют среду в виде независимо “работающих” точечных дифракторов, но определяют тип взаимодействия отдельных элементов этой модели. В частности, модель, использованная Ю. В. Ризниченко, представляет собой набор одинаковых точечных масс, расположенных на равном расстоянии l друг от друга и объединённых упругими связями (т. е. такие элементы всегда “работают” согласованно). Поэтому цепочка реагирует на внешнее воздействие как единая система, а не как набор независимых элементов. Эта же модель была детально изучена Л. И. Мандельштамом [8], который представлял

*О геологических моделях реальных сред и их свойствах см. [13].



Рис. 1. Дискретная модель среды, использованная в работах Мандельштама и в работах Ризниченко

упругую связь между элементами модели в виде пружины (рис. 1). Ввиду важности обоснования модели для вывода уравнений динамической теории упругости рассмотрим этот вопрос подробнее.

Пусть среда, структуру которой требуется изучить, описывается дискретной моделью, схематически показанной на рис. 1. К среде прикладывается внешнее (например, монохроматическое) воздействие, порождающее развитие волновых процессов, особенности которых можно изучить двумя способами.

Первый путь к изучению физики распространения волн заключается в описании явления на микроуровне. Допустим, мы можем задать положение всех молекул среды на момент времени, предшествующий внешнему воздействию. Зная уравнение колебаний масс, связанных пружинами, выпишем решение для всех молекул вещества, откуда сделаем заключение о свойствах сейсмической волны. Излишне говорить, что этот способ расчёта относится скорее к области фантастики, а не науки (но можно допустить, что когда-либо вычислительные мощности будут позволять решать такие задачи, пусть и бессмысленные с точки зрения сейсморазведки).

Второй путь - рассматривать среду как сплошное тело и вывести уравнения динамики упругих волн в таком теле. Этот способ приводит к неизбежному отказу от описания волновых процессов на микроуровне и фактически игнорирует дискретность среды.

Понятно, что все существующие на сегодняшний день (и все, которые будут существовать завтра) алгоритмы исследования сейсмических волн развиваются в русле второго пути. И на это есть иные причины, кроме недостатка вычислительных мощностей (о них мы скажем чуть позже). С другой стороны, всегда необходимо помнить, что сплошная модель исследуемой среды есть идеализация. Она вводится не только в силу изложенных выше причин, но и потому, что для такой ситуации мы можем использовать удобный математический аппарат - теорию непрерывных функций.

Итак, допустим мы выписали уравнение колебаний цепочки, составленной из дискретных частиц*. В этом уравнении фигурирует фактор, являющийся отношением l/λ , где λ - длина волны внешнего воздействия, l - расстояние между соседними частицами в цепочке. Очевидно, что для типичных сейсмических сигналов (обычные сигналы не монохромны, но здесь мы можем за λ условно принять $\lambda_{\text{дом}}$) всегда выполнено $l/\lambda \ll 1$. В такой асимптотике можно показать, что выписанное уравнение динамики волны на микроуровне с очень высокой степенью точности соответствует аналогичному уравнению, записанному для макрозадачи. Последнее явля-

* Учитывая популярный характер статьи, уравнение здесь не приводится.

ется уравнением, выражающим закон Гука, из которого получим хорошо известные динамические уравнения теории упругости для сплошной среды. Таким образом, мы убедились в том, что понятие однородной среды достаточно надёжно обосновано для всех классов задач, с которыми имеет дело сейсморазведка.

С учётом сделанных оговорок можно предложить классификацию моделей сред (она приведена в [13]), включающую слоистые твёрдые тела, зернистые среды, трещиноватые породы, жидкие суспензии и т. д. Таким образом, среда действительно может содержать множественные вкрапления, обеспечивающие рассеяние энергии “запальной” волны. Другой вопрос, можем ли мы строить алгоритмы обработки данных, опираясь на такие модели? Скорее всего, нет. Например, если посмотреть на схему D -преобразования, то для построения необходимого оператора (он вычисляется из динамического годографа дифрагированной волны) необходимо решить прямую задачу. Для этого модель среды должна быть точно известна, по крайней мере, в интервале глубин от свободной поверхности до глубинной точки, в которой расположен гипотетический вторичный источник. Полагаю, что излишне описывать трудности восстановления модели такой среды, да и решение прямой задачи (расчёт динамического годографа) будет сопряжено с известными проблемами. Таким образом, привлечение понятия вторичных источников Гюйгенса на самом деле приводит к невозможности реализации преобразования.

Почему же оно всё-таки работает? На этот вопрос уже были даны содержательные и исчерпывающие ответы, которые не требовали аппроксимации среды точечными дифракторами. Например, в книге Г. И. Петрашени и С. А. Нахамкина [9] приводится вывод D -преобразования на основании геофизически осмысленной пластовой модели среды. Если рассматривать кинематический аспект преобразования, то интерпретация алгоритма может быть совсем простой и даже более наглядной, чем принцип вторичных дифракторов. Автор этих строк хорошо помнит беседу с В. М. Глоговским, которая состоялась много лет назад. Тогда, не будучи геофизиком по образованию, я изучал постановку и способы решения задачи сейсмической миграции. Из учебника И. И. Гурвича и Г. Н. Боганика [5] я узнал, что миграция есть обнаружение в волновом поле дифрагированных волн, их локализация и приписывание результата обнаружения заданной глубинной точке. Я знал, что взаимодействие волны с неоднородностями среды вида разлома, клина и т. д. может приводить к эффекту дифракции, но ведь в учебнике утверждалось, что миграция обеспечивает корректное преобразование волн, отражённых от плавных границ, т. е. когда дифракция невозможна. Какие же тогда волны мы будем обнаруживать и выделять? И здесь “на помощь” пришёл принцип Гюйгенса в его вульгарном понимании: плавная отражающая граница распадается на бесконечное множество независимых точечных дифракторов. Такое допущение вроде бы восстанавливало логику задачи. Выслушав мои рассуждения, Владимир Маркович лишь иронично улыбнул-

ся и предложил вместе с ним проделать следующую цепочку рассуждений.

Пусть через глубинную точку с координатами (x_0, z_0) проходит граница $z^{(\phi)}(x)$, которая в этой точке имеет наклон ϕ . Такой границе на разрезе соответствует локально-плоская волна $t_0^{(\phi)}(x)$. Для совокупности всех возможных наклонов ϕ глубинной границы можно получить семейство прямых $t_0^{(\phi)}(x)$, а огибающей этого семейства по параметру ϕ будет гипербола, являющаяся хорошо известным оператором D -преобразования (она же - годограф дифрагированной волны, вызванной вторичным точечным источником, расположенным в точке (x_0, z_0)). Суммирование исходного волнового поля по такой огибающей обеспечивает выделение волны (путём синфазного накапливания сигналов в некоторой окрестности точки касания годографа отражённой волны траекторией оператора), соответствующей реальному значению угла наклона ϕ . Результат выделения “приписывается” глубинной точке (x_0, z_0) , что на мигрированном разрезе во временной области соответствует преобразованию реальных времён вступления сейсмических волн в “вертикальные” времена.

Теперь совершим небольшой экскурс в теорию дифракции, рассмотрев отдельные аспекты её исторического развития [2, 6]. Хотя это несколько отклоняет нас от логики изложения, но позволяет с иной точки зрения взглянуть на принцип Гюйгенса, на его точную формулировку и вульгарную трактовку. В работах, датированных концом XVII в., голландский учёный Х. Гюйгенс изучал вопросы теории распространения света, полагая при этом, что веществом, “проводящим” свет, является эфир, наполненный множеством мелких частиц. Каждая из этих частиц, будучи возбуждённой “запальной” волной, становилась точечным источником и излучала вторичные волны. Понятно, что математическая формулировка такого процесса подразумевает выражение для оператора продолжения исходной “запальной” волны в виде поля точечного источника. Гипотеза не нашла подтверждения при её практической проверке, оказалось, что теория Гюйгенса описывает процесс распространения света с существенными погрешностями. Главной заслугой Гюйгенса явилось открытие волновой природы света.

Недостаток представлений Гюйгенса был вскрыт в начале XIX в. О. Ж. Френелем, который постулировал необходимость введения поправочного множителя, зависящего от угла между нормалью к фронту “запальной” волны и направлением на точку, в которую прогнозируется поле (рис. 2). Из представлений Гюйгенса о среде как о совокупности независимо излучающих вторичные волны точечных дифракторов вовсе не следовало необходимости учёта каких-либо угловых коэффициентов. Наконец, в конце XIX в. немецкий учёный Г. Р. Кирхгоф предложил строгое математическое описание процедуры продолжения волны по значению её фронта, заданному в некоторый момент времени. Из результатов, полученных Кирхгофом, следовало, что оператором продолжения является не точечный источник Гюйгенса, а его производная по нормали к фронту волны, при этом вычисление такой производной может сводиться

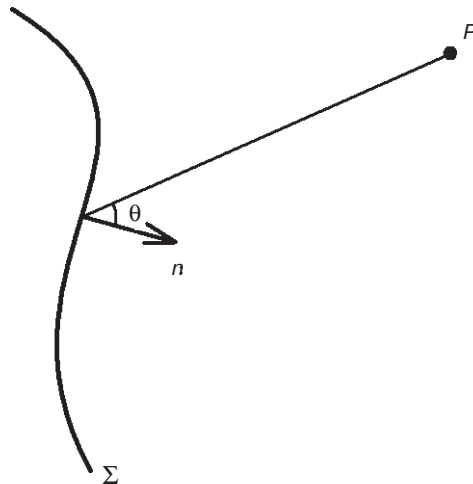


Рис. 2. Продолжение фронта волны, имеющего в некоторый момент времени конфигурацию Σ , в точку P : n - вектор нормали к Σ в точке, лежащей на Σ ; θ - угол, составленный нормалью и отрезком, соединяющим точку на Σ и точку P

(асимптотически и с точностью до константы) к умножению поля точечного источника на косинус угла θ , образованного нормалью и направлением на точку, в которую производится прогнозирование. Предложенная Кирхгофом теория нашла убедительное экспериментальное подтверждение. Если, как это принято в миграции методом “взрывающихся границ”, предположить, что в нулевой момент времени фронт волны совпадал с некоторой реально присутствующей в среде глубинной границей, то учёт множителя $\cos\theta$ определяет направленность элементарной площадки, и это исключает гипотезу независимо действующих точечных дифракторов. “Исправленный” Френелем и Кирхгофом принцип Гюйгенса не позволяет рассматривать среду как набор точечных дифракторов, но приводит к необходимости представления неоднородностей в виде достаточно протяжённых границ, минимальный масштаб элемента которых определяется размером зоны Френеля.

О “ТЕХНОЛОГИЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ”

Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков в своих рассуждениях используют не вполне традиционный термин “технологичная сейсморазведка”, противопоставляя её “классической” сейсморазведке. Поэтому здесь уместно сделать несколько замечаний относительно особенностей таких сейсморазведок.

Полагаю, что одной из основных причин неразрешённых до сих пор разногласий является вопрос: сейсморазведка это наука или технология? Для того чтобы отделить науку от технологии воспользуемся известной работой А. Е. Левина [7], посвящённой этой проблеме, где автор проводит последовательное сопоставление науки и технологии как областей человеческой деятельности со времён древнего мира до современности.

Технология всегда довольствуется исключительно результатом, игнорируя способ, которым этот результат получен. Например, с точки зрения технологии нефтяная сейсморазведка оправдана тем, что по результатам структурных построений, получаемых в процессе обработки, предсказывается расположение ловушек углеводородов. Если такое предсказание осуществляется с достаточной степенью надёжности, т. е. если высока подтверждаемость бурением, то какая разница, как был получен результат, какие алгоритмы использовались и какие допущения были сделаны относительно модели среды? Наверное, такая точка зрения отчасти оправдана, и именно она лежит в основе “технологичной сейсморазведки”.

Сравнивая научный подход с технологией, А. Е. Левин указывает на то, что первый не может удовлетвориться лишь итоговым верным результатом, но сам метод его получения оказывается не менее важным. Проверяется математическая корректность алгоритмов, их соответствие модели среды и, разумеется, адекватность этой модели реальной горной породе. Хорошо известно, что Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков всегда были сторонниками научного пути (он назван ими “классической” сейсморазведкой), и недостаточно точное обоснование алгоритма является для них поводом сомневаться и в получаемых с его помощью результатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Публикуемая статья Г. И. Петрашень и А. Г. Рудакова не опровергает используемые нами подходы, не призывает к революционным преобразованиям и не подрывает основы (хотя в своё время именно это увидели в ней некоторые оппоненты). Она предлагает нам продолжать исследования в русле классической сейсморазведки (т. е. придерживаться научного подхода) и, в частности, искать надёжные, разумные и достоверные обоснования зачастую интуитивно “нащупанным” алгоритмам обработки данных, которые хорошо зарекомендовали себя на практике и прочно вошли в традиционные графы обработки.

Подведём краткий итог сказанному выше о принципе Гюйгенса. В изначальной трактовке, предложенной

самим Гюйгенсом, среда рассматривалась как совокупность независимых точечных дифракторов, порождающих вторичные волны. Такая модель оказалась неверной, т.е. она была опровергнута экспериментально. Поздняя формулировка принципа Гюйгенса, предложенная Френелем и уточнённая Кирхгофом, рассматривает среду как совокупность достаточно протяжённых границ. Теоретические выводы, сделанные на основании такого представления, подтверждены экспериментально. Вероятно, сейсморазведка остаётся последней областью знаний, где всё ещё верят в правильность идей Гюйгенса (и бережно передают свою веру из поколения в поколение). Надеюсь, что усилиями Г. И. Петрашень и А. Г. Рудакова удастся устранить этот анахронизм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аки К., Ричардс П., 1983, Количественная сейсмология, т. 1, т. 2: М., Мир.
2. Борн М., Вольф Э., 1973, Основы оптики: М., Наука.
3. Бреховских Л. М., 1973, Волны в слоистых средах: М., Наука.
4. Гольдин С. В., 2005, Судьба идеи: Технологии сейсморазведки, 3, 4 - 6.
5. Гурвич И. И., Боганик Г. Н., 1980, Сейсмическая разведка: М., Недра.
6. Ландсберг Г. С., 2003, Оптика: М., Наука.
7. Левин А. Е., 1977, Миф. Технология. Наука.: Природа, 3, 88 - 101.
8. Мандельштам Л. И., 1955, Полное собрание трудов. Т. IV. Лекции по колебаниям: М., Изд-во АН СССР.
9. Петрашень Г. И., Нахамкин С. А., 1973, Продолжение волновых полей в задачах сейсморазведки: Л., Наука.
10. Ризниченко Ю. В., 1985, Сейсморазведка слоистых сред: М., Недра.
11. Тимошин Ю. В., 1972, Основы дифракционного преобразования сейсмических записей: М., Недра.
12. Тимошин Ю. В., 1978, Импульсная сейсмическая голография: М., Недра.
13. Уайт Дж. Э., 1986, Возбуждение и распространение сейсмических волн: М., Недра.
14. Финк Л. М., 1984, Сигналы. Помехи. Ошибки...: М., Радио и связь.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Михаил Сергеевич ДЕНИСОВ - ведущий математик ООО “Геотехсистем”, доктор физ.-мат. наук.