

Imaging shallow subsurface inhomogeneities By 3D multipath diffraction summation Построение изображения приповерхностных неоднородностей с использованием многолучевого дифракционного суммирования 3D

Владимир Штивельман* и Шемер Кейдар*
Vladimir Shtivelman* and Shemer Keydar*

Представляем новый метод построения изображения неглубокозалегающих замкнутых неоднородностей земной толщи. Этот метод основан на трехмерном дифракционном суммировании с использованием многолучевого подхода, при котором для каждой отображаемой точки, суммируется поле волн вдоль всевозможных траекторий распространения дифрагированных волн. Одним из главных преимуществ этого метода является то, что он не требует информации о распределении скоростей по глубине. Использование этого метода на примере сейсмических данных показывает, что можно получать четкие изображения подземных объектов вблизи их истинного пространственного положения.

Предлагаемая методика построения изображения может быть модифицирована с помощью разнообразных приложений, основанных на суммировании сейсмических данных во временной области, например суммировании по ОСТ, миграции во временной области до и после суммирования, и других.

Введение

Обнаружение и картирование замкнутых приповерхностных неоднородностей является важной проблемой в приложении к разнообразным задачам, среди которых исследования площадок под строительство, экологические и археологические изыскания и другие задачи. Типичным примером таких неоднородных объектов являются пустоты, пещеры и туннели. С этими целями были разработаны различные геофизические методики. В частности, для построения изображения приповерхностных неоднородностей были предложены две группы сейсмических методов. В первой группе методик используются волны, дифрагированные или рассеянные на приповерхностных объектах (Landa и др. 1987; Kanasevich и Phadke 1988; Belfer и др. 1998; Landa и Keydar 1998). В методиках используются поверхностные волны, которые содержатся в сейсмических записях (Park и др., 1998; Leparoux и др., 1999; Shtivelman 2002, 2003). Серьезным недостатком обеих групп методик является то, что они являются методиками 2D, тогда как картируемые объекты являются трехмерными. Картирование таких объектов с помощью метода 2D может дать надежные результаты только в том случае, если целевой объект расположен под сейсмическим профилем, вдоль которого произведены исследования. Если это не так, построенное изображение будет неудачным, или окончательный результат будет пространственно размыт или будет иметь неверное местоположение.

С целью преодоления этой проблемы, мы предлагаем новую методику построения изображения с использованием дифрагированных волн для 3D случая. Наш подход предполагает, что каждая точка пространства 3D является предполагаемой точкой дифракции, и ее картирование выполняется с помощью суммирования сейсмической энергии вдоль всевозможных осей синфазности дифрагированных волн (задаваемых геометрией источника-приемника),

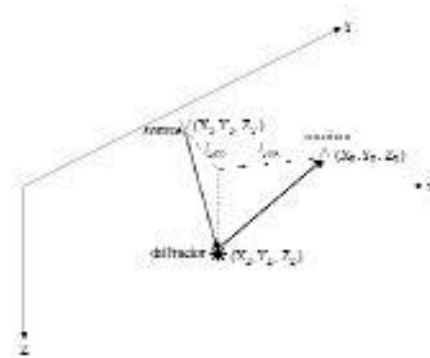


Рисунок 1 Схема, иллюстрирующая принципиальную геометрию дифракции для заданной пары источник-приемник.

у которых одна и та же вершина в заданной точке. Этот подход не требует дополнительной информации по скоростям, поскольку производимое многолучевое суммирование выполняется для всех возможных значений скоростей в заданном диапазоне (Keydar 2004).

Применение предлагаемой методики иллюстрируется на примерах синтетической и реальной записи.

Методика многолучевого суммирования

Предположим, что в однородной среде, характеризующейся скоростью V , в точке (X_D, Y_D, Z_D) расположен дифрагирующий объект. Тогда для набора точек возбуждения (X_S, Y_S, Z_S) и точек приема (X_R, Y_R, Z_R) , кинематический отклик дифрагирующего объекта (поверхность равных времен дифрагированной волны) будет выражаться следующим образом (Рис. 1):

$$T_{SR} = \frac{\sqrt{(X_D - X_S)^2 + (Y_D - Y_S)^2 + (Z_D - Z_S)^2}}{V} + \frac{\sqrt{(X_R - X_D)^2 + (Y_R - Y_D)^2 + (Z_R - Z_D)^2}}{V} \quad (1)$$

Первый корень в выражении (1) определяет траектории источника – дифрагирующий объект, тогда как второй корень задает траекторию дифрагирующий объект - приемник. Член V – коэффициент, определяющий форму поверхности равных времен дифрагированной волны.

Предположим, что источники и приемники расположены на поверхности ($Z_S = Z_R = 0$) и введем следующие обозначения:

$$\sqrt{(X_D - X_S)^2 + (Y_D - Y_S)^2} = L_{SD} \quad (2)$$

$$\sqrt{(X_R - X_D)^2 + (Y_R - Y_D)^2} = \xi_{TRR}, \quad (3)$$

$$Z_D/V - T_{TR} \quad (4)$$

Мы можем переписать выражение (1) в следующей форме:

$$T_{TR} = \sqrt{\left(\frac{X_D - X_R}{V}\right)^2 + \left(\frac{Y_D - Y_R}{V}\right)^2} + T_D. \quad (5)$$

Можно легко заметить, что для разных значений V и фиксированного значения T_D , выражение (5) задает семейство поверхностей равных времен дифрагированной волны различной формы и с одной вершиной на времени $2T_D$. Если известно точное значение V , то для каждого фиксированного (X_D, Y_D, Z_D) дифрагирующий объект может отображаться путем суммирования сейсмических волн по поверхности равных времен дифрагированной волны, задаваемой выражением (5):

$$DI = \sum_S \sum_R U_{S,R}(T_{2K}), \quad (6)$$

где $U_{S,R}(T)$ - сейсмотрасса для заданного положения источника и приемника, суммирование выполняется для всевозможных положений источника и приемника. Если скорость неизвестна, ее можно оценить путем нахождения максимума некой функции (например, подобия). Хотя, в пространстве 3D чувствительность и разрешение оценочных значений, получаемых с помощью такой функции, обычно невысоки. Альтернативным способом построения изображения дифрагирующих объектов, который не требует оценки скорости, является многолучевой подход (Keydar 2004), который можно описать следующим выражением:

$$DI = \sum_V \sum_S \sum_R U_{S,R}(T_{2K}(V)), \quad (7)$$

Где внешнее суммирование выполняется для всех возможных значений скорости в пределах задаваемого диапазона. Построение изображения дифрагирующего объекта, определяемое выражением (7) означает, что для каждой отображаемой точки, сейсмические амплитуды суммируются вдоль всех возможных траекторий дифрагированных волн, заданных выражением (5). Благодаря усиливающей и ослабляющей интерференции амплитуд, которые привносятся каждой траекторией дифрагированной волны, получают картину дифракции, близкую к той, которая получается при суммировании с правильной скоростью. Кейдар (Keydar, 2004) показал, что подход многолучевого суммирования имеет сходства с принципом интеграла Фейнмана по контуру (Feynman и Hibbs 1965); он может давать четкие изображения и сохранять форму исходного сигнала даже при низком соотношении сигнал-шум.

Пример 1: Построение изображения неглубокой каверны

Рассмотрим пример, который иллюстрирует предлагаемый подход на примере данных малоглубинной сейсмической съемки. Данные были получены вблизи скважины; в диапазоне глубин 21 - 27 м в слое соли была встречена каверна, заполненная водой. Предполагается, что каверна будет представлять собой дифрагирующий объект.

Сейсмическая съемка, выполненная на этом объекте, включала в себя два приемных профиля и пять взрывных профилей, они схематически показаны на рисунке 2. Длина каждого профиля - 120 м. Скважина располагалась вблизи к центру третьего взрывного профиля ($X = 60$ м,

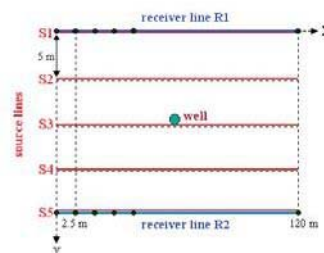


Рисунок 2 Пример 1: Схема профилей сейсмической съемки, выполненной вблизи подземной каверны, обнаруженной в скважине (вид в плане). Съемка включала в себя две приемные линии и пять взрывных профилей. Шаг между источниками и приемниками был 2.5 м.

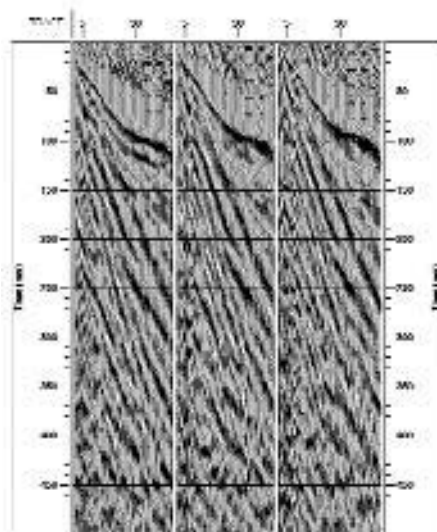


Рисунок 3 Пример 1: три типичных полевых записи от различных взрывных профилей.

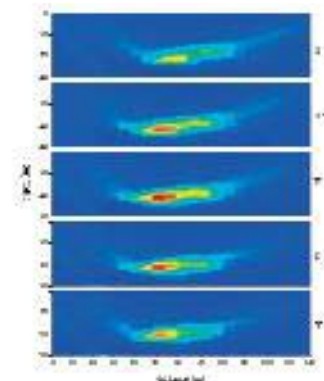


Рисунок 4 Пример 1: Пять вертикальных срезов дифракционного суммирования 3D, полученного по методике многолучевого суммирования. Срезы отображены в глубинной области для фиксированных значений Y , показанных справа.

$Y = 9$ м). Расстояние между взрывными профилями - 5 м; расстояния между источниками и приемниками 2.5 м. В качестве источника сейсмических волн использовался Digipulse (источник типа падающий груз, установленный на грузовике); в качестве регистрирующего устройства использовалась 48-канальная сейсмостанция Strata View. На рис. 3 показаны три исходные (необработанные)

записи с различных взрывных профилей. На данных заметно присутствие высокоамплитудных поверхностных волн; признаков дифрагированных волн не встречено.

На рисунке 4 показаны результаты картирования дифрагирующего объекта, полученного с помощью многолучевого суммирования, определяемого выражением (7). Результаты представлены в глубинной области, для удобства проведения сравнения с известным пространственным положением каверны. С этой целью мы использовали значение скорости, равное 800 м/с, эта оценка получена по данным съемки МПВ, которая ранее проводилась на этом объекте. На рисунке показаны вертикальные срезы результатов 3D дифракционного суммирования в плоскости (X, Z) для пяти значений Y. На срезах четко видна аномалия с ослаблением амплитуды с удалением от точки расположения скважины (Y = 10 м). Необходимо отметить, что наклон и ширина аномалии определяются латеральным разрешением метода, и не обязательно связаны с формой и шириной картируемого объекта. В общем случае, разрешение зависит от нескольких факторов, таких как длина волны сейсмического сигнала, пространственной дискретизации, выбранной для съемки, размеров объекта (по отношению к глубине его залегания) и предполагаемой формы объекта. В частности, что касается миграции по Кирхгофу, наш метод может отобразить точечный дифрагирующий объект в виде оси синфазности квазигиперболической формы, с вершиной, соответствующей положению этого объекта. Поскольку мы считаем каверну точечным объектом, его положение можно определить по максимуму аномалии (отмеченной красным цветом). Этот максимум достигается на центральном срезе (Y = 10 м) в точке с координатами X = 57 м и Z = 21 м. Оценочное положение дифрагирующего объекта хорошо согласуется с истинным положением каверны, определенном по скважине.

Пример 2: Построение изображения синтетических дифрагирующих объектов.

Для тестирования применимости нашего подхода для случая нескольких объектов, имеющих различное пространственное положение, рассмотрим следующий синтетический пример. Модель, которая используется в примере

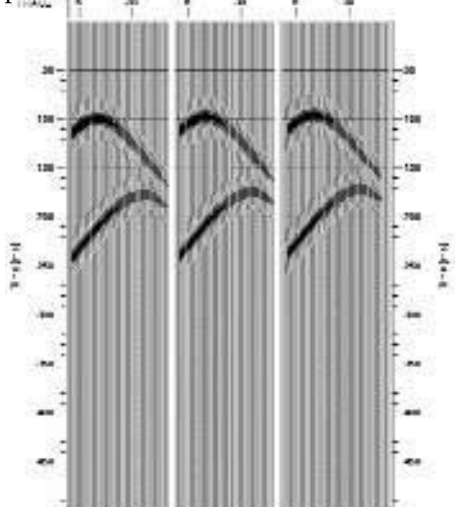


Рисунок 5 Пример 2: Три синтетических записи для модели, включающей в себя два точечных дифрагирующих объекта.

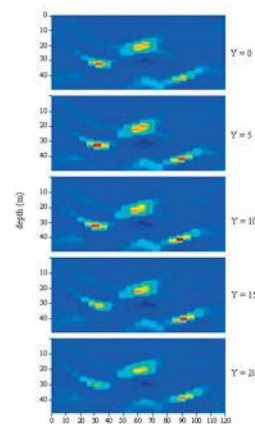


Рисунок 6 Пример 2: Пять вертикальных срезов результатов дифракционного суммирования 3D, полученных на основе методики многолучевого суммирования комбинированных данных (реальных + синтетических). Срезы отображены в глубинной области для фиксированных значений Y, показанных справа.

включает в себя два дифрагирующих объекта, расположенных в точках (X = 30 м, Y = 10 м, Z = 30 м) и (X = 85 м, Y = 15 м, Z = 40 м). Для модели была выбрана скорость, равная 800 м/с. Система наблюдений была такой же, как и в примере для реальных данных, представленном выше. На Рисунке. 5 показан кинематический отклик на дифрагирующие объекты на трех записях, соответствующих различным взрывным профилям. Путем добавления синтетических данных к реальным из приведенного примера в соотношении 1/10, мы построили новый набор данных, и применили к комбинированному данным многолучевое суммирование. На рисунке 6 представлено пять вертикальных срезов результата дифракционного суммирования 3D. Срезы были выбраны в тех же точках, что и в приведенном примере с реальными данными. Аномалии на срезах имеют квазигиперболическую форму, считается, что точки положения дифрагирующих объектов соответствуют максимуму аномалий (выделенному красным цветом). На рисунке ясно видно, что положение всех трех максимумов (верхний соответствует реальному объекту, два других модельным объектам) отвечает истинным положениям дифрагирующих объектов.

Резюме

Мы представили новый подход к построению изображения приповерхностных неоднородностей. Предложенная методика основывается на многолучевом суммировании поля волн вдоль всевозможных траекторий дифрагированных волн в пространстве 3D, где каждая точка среды считается точечным дифрагирующим объектом. Применение методики на синтетических и полевых данных показывает, что метод дает возможность получать четкие изображения дифрагирующих объектов вблизи их истинного местоположения в пространстве.

Приведенные выше результаты были получены в предположении о том, что отображаемая приповерхностная неоднородность (каверна) является замкнутым объектом, который можно представить в виде точечного дифрагирующего объекта. Для других типов объектов, таких как тоннели или плоскости разломов, необходима модернизация метода в целях улучшения пространственной разрешенности и увеличения соотношения сигнал-шум на результатах отображения. Это будет объектом дальнейших исследований.

Благодарность

Авторы работы хотят поблагодарить Министерство инфраструктуры за финансовую помощь, а также Геофизический Институт Израиля за предоставленное разрешение на публикацию данной статьи.

Литература

- Belfer, I., Bruner, I., Keydar, S., Kravtsov, A. and Landa, E. [1998] Detection of shallow local objects using refracted and diffracted seismic waves. *Journal of Applied Geophysics* **38**, 155-168.
- Feynman, R. and Hibbs, A. [1965] *Quantum Mechanics and Path Integrals*. McGraw Hill.
- Kanasevich, E.R. and Phadke, S.M. [1988] Imaging discontinuities on seismic sections. *Geophysics* **53**, 334-345.
- Keydar, S. [2004] Homeomorphic imaging using path integrals. . Proceedings of the 66th EAGE Meeting, Paris.
- Landa, E. and Keydar, S. [1998] Seismic monitoring of diffracted images for detection of local heterogeneities. *Geophysics* **63**, 1093-1100.
- Landa, E., Shtivelman, V. and Gelchinsky, B. [1987] A method for detection of diffracted waves on common-offset sections. *Geophysical Prospecting* **35**, 359-373.
- Leparoux, D., Grandjean, G. and Bitri, A. [1999] Underground cavities detection using seismic Rayleigh waves. *Proceedings of the 5th EEGS Meeting, Budapest*.
- Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. [1998] Ground roll as a tool to image near-surface anomaly. *Proceedings of the 68th SEG Meeting, New Orleans*.
- Shtivelman, V. [2002] Surface wave sections as a tool for imaging subsurface inhomogeneities. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* **7**, 121-138.
- Shtivelman, V. [2003] Improving the resolution of shallow seismic sections using eigenimage analysis. *Near Surface Geophysics* **1**, 149-154.