УДК. 550.384

О.П. Петровский, Я.М. Кропивницкий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОПАГАТОРОВ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Рассмотрен эффективный способ приближенного решения прямой динамической задачи сейсморазведки с использованием теории кинематического и динамического пропагаторов. Разработанный алгоритм включен, в качестве подсистемы, в автоматизированную систему количественной комплексной интерпретации геолого-геофизических данных GCIS. Проведенный вычислительный эксперимент показал адекватность и вычислительную эффективность полученного решения в сопоставлении с традиционным сеточным методом решения прямой динамической задачи сейсморазведки.

Ключевые слова: кинематический пропагатор, динамический пропагатор, сейсморазведка, прямая задача, лучевая теория.

Введение

Повышение эффективности изучения геологической среды может быть реализовано благодаря обеспечению использования эффективных методов анализа геофизической, и в первую очередь сейсмической информации.

Прямая динамическая задача сейсморазведки является важным элементом процесса интерпретации сейсмических данных. С помощью прямой задачи сейсморазведки обеспечивается решение обратной задачи сейсморазведки методом подбора. В связи с чем для ее использования в итерационном процессе необходимо, чтобы вычисления производились достаточно быстро, и использовали современные высокопродуктивные многопроцессорные и многомашинные вычислительные системы. Одним из способов, который обеспечивает получение хотя и приближенного, но такого эффективного в вычислительном плане решения, является лучевое приближение. В лучевом приближении решение волнового уравнения делится на две части. Первая связана с расчетом траектории и времени распространения упругих волн, а вторая с расчетом изменений амплитуды упругой волны при ее распространении в слое, преломлении и отражении на границах скачкообразного изменения скоростных свойств.

Известна [Петровский, Ковальчук, 1987] эффективная и устойчивая схема решения прямой кинематической задачи сейсморазведки с использованием кинематического пропагатора, которая основана на теории полей времен и принципе Ферма – траектория распространения волны отвечает минимальному времени между всеми другими траекториями, соединяющими две точки пространства.

Использование кинематических пропагаторов для расчета времен прихода падающих и отраженных волн

Согласно теории кинематического пропагатора геологическая среда может быть параметризирована системой из *N* границ – спрямляемых кривых, представленных в виде непрерывных функций профильных координат:

$$\Gamma_i = \{x_i, f_i(x_i)\} = \{\xi_i\} \;,\; i = 0,1,...N \,, \quad (1)$$

которая вместе со значениями пластовых скоростей $V_i(x, y)$ является структурной скоростной моделью. Здесь N – количество границ среды, $\xi_i = (x_i, f_i(x_i))$ – точка границы Γ_i . Функция времени прихода волны из точки кровли ξ_i в точку подошвы ξ_{i+1} i-го слоя $\tau(\xi_i, \xi_{i+1})$ принимается равным минимальному времени по всем траекториям, сходящимся к точке ξ_{i+1} подошвы, и называется кинематическим пропагатором i-го слоя.

Значение времени прихода является решением вариационной задачи для функционала:

$$\tau(\xi_i, \xi_{i+1}) = \int_L \frac{\mathrm{d}l}{V(l)} \to \min \,, \quad (2)$$

где L – линия, соединяющая точки ξ_i и ξ_{i+1}, $V(l)$ – значение пластовой скорости по линии L.

В соответствии с принципом Ферма время прихода волны в некоторую точку границы Γ_{i-1} определяют как минимальное время по всем траекториям. Тогда для i-го слоя можно записать время прихода:

$$t_i(\xi_i) = \min_{\xi_{i-1}} \left(t_{i-1}(\xi_{i-1}) + \tau(\xi_{i-1}, \xi_i) \right). \quad (3)$$

Для пропагаторов определяется операция свертки, позволяющая вычислить время прихода волны через систему слоев.

$$\begin{aligned} \tau(\xi_i, \xi_k) &= \min_{\xi_j} \left(\tau(\xi_i, \xi_j) + \tau(\xi_j, \xi_k) \right) = \\ &= \tau(\xi_i, \xi_j) * \tau(\xi_j, \xi_k). \end{aligned} \quad (4)$$

Используя операцию свертки можно записать время прихода волны на подошву N-го слоя:

$$\begin{aligned} t_N(\xi_N) = t_0(\xi_0) * \tau(\xi_0, \xi_1) * \tau(\xi_1, \xi_2) * ... \\ * \tau(\xi_{N-2}, \xi_{N-1}) * \tau(\xi_{N-1}, \xi_N). \end{aligned} \quad (5)$$

Использование динамического пропагатора для расчета амплитуд волн вдоль направления распространения лучей

Решение прямой кинематической задачи сейсморазведки описанным выше способом позволяет получить для заданной структурной модели траектории сейсмических лучей. Имея лучи, геометрию границ и физические свойства пород в каждом из слоев, можно рассчитать амплитуды волны при прохождении границы раздела слоев.

Когда продольная волна проходит через плоскую границу раздела двух сред с различными акустическими импедансами, часть энергии идет на образование продольной отраженной и преломленной волн, а часть – поперечных волн. Используя уравнения Цепритца [Шериф, 1987],

$$\begin{pmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\delta_1 & \cos\theta_2 & \sin\delta_2 \\ \sin\theta_1 & \cos\delta_1 & -\sin\theta_2 & \cos\delta_2 \\ \cos 2\delta_1 & -\dfrac{Vs_1}{Vp_1}\sin 2\delta_1 & -\dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}\dfrac{Vp_2}{Vp_1}\cos 2\delta_2 & -\dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}\dfrac{Vs_2}{Vp_1}\sin 2\delta_2 \\ \sin 2\theta_1 & \dfrac{Vp_1}{Vs_1}\cos 2\delta_1 & \dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}\dfrac{Vp_1}{Vp_2}\dfrac{Vs_2^2}{Vs_1^2}\sin 2\theta_2 & -\dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}\dfrac{Vp_1\cdot Vs_2}{Vs_1^2}\cos 2\delta_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Rp \\ Rs \\ Tp \\ Ts \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ -\sin\theta_1 \\ -\cos 2\delta_1 \\ \sin 2\theta_1 \end{pmatrix}, \qquad (6)$$

где θ_1 – угол падения продольной волны, θ_2 – угол преломления продольной волны, δ_1 – угол отражения поперечной волны, δ_2 – угол преломления поперечной волны, $Rp = \dfrac{A_1}{A_0}$ – коэффициент отражения продольной волны, $Tp = \dfrac{A_2}{A_0}$ – коэффициент прохождения продольной волны, $Rs = \dfrac{B_1}{A_0}$ – коэффициент отражения поперечной волны, $Ts = \dfrac{B_2}{A_0}$ – коэффициент прохождения поперечной волны.

Решая уравнение (6) получаем коэффициенты отражения Rp и прохождения Tp для продольных волн, что дает возможность последовательно рассчитать все амплитуды на каждой границе раздела вплоть до выхода на дневную поверхность, причем с учетом многократных отражений.

С целью исследования корректности и вычислительной эффективности разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения были выполнены расчеты прямой динамической задачи сейсморазведки для тестовой модели (рис. 1-3) в сопоставлении с аналогическими вычислениями с использованием пакета динамического сейсмического моделирования Tesseral 2D (Tesseral Technologies Inc.) (рис. 4).

Рис. 1. Тестовая трехслойная модель среды

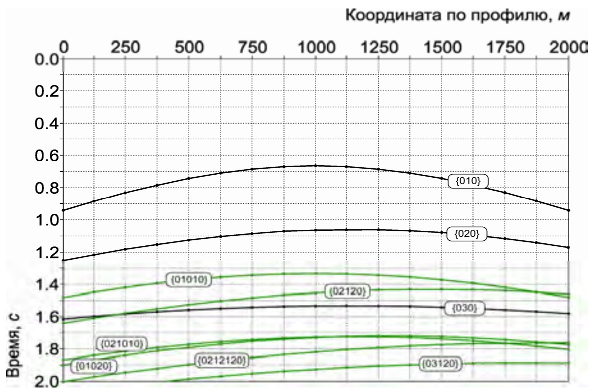

Рис. 2. Рассчитанные годографы однократных и многократных волн общей точки возбуждения для пикета возбуждения *x*=1000 *м* с кодом

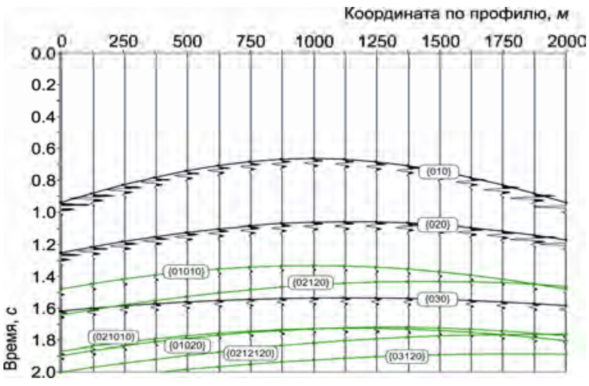

Рис. 3. Результат решения прямой динамической задачи сейсморазведки в виде сейсмограммы ОТВ для пикета возбуждения *x*=1000 *м* (однократные и многократные отражения)

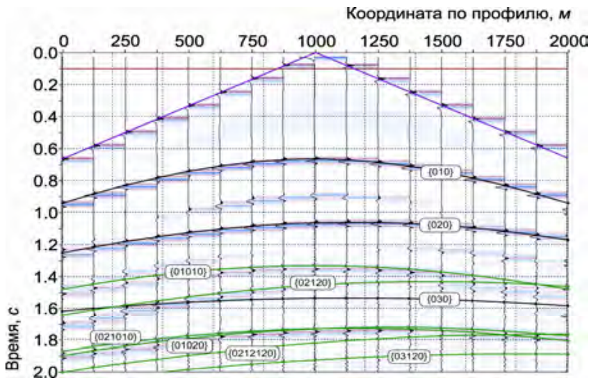

Рис. 4. Сопоставление рассчитанной с помощью Tesseral 2D сейсмограммы с рассчитанными годографами для пикета

Выводы

Описанный приближенный способ решения прямой динамической задачи сейсморазведки реализован в виде элемента подсистемы решения прямой динамической задачи сейсморазведки в автоматизированной системе количественной комплексной интерпретации GCIS.

Результаты расчетов для тестовой модели показали высокую вычислительную эффективность по сравнению с подходом, основанном на решении волнового уравнения сеточным методом. Результатом является возможность использования предложенного метода в схемах решения обратной задачи сейсморазведки.

Преимуществом метода является возможность проводить раздельные вычисления как однократных, так и многократных волн, что может быть полезным при скоростном анализе данных ОГТ.

Литература

Петровский А.П., Ковальчук С.П. О непосредственном применении принципа Ферма в расчетах полей времен в слоистых средах. // Деп. в УкрНИИНТИ 13.10.1987 № 2893, Ук. 87. – 1987. – 13 с.

Шерифф Р.Е., Сейсморазведка. / Шериф Р.Е., Гелдарт Л.П. – Т. 1. – М.: «Недра», 1987.

ВИКОРИСТАННЯ КІНЕМАТИЧНОГО І ДИНАМІЧНОГО ПРОПАГАТОРІВ ДЛЯ НАБЛИЖЕНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПРЯМОЇ ДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ СЕЙСМОРОЗВІДКИ

О.П. Петровський, Я. М. Кропивницький

Розглянуто ефективний спосіб наближеного розв'язування прямої динамічної задачі сейсморозвідки з використанням теорії кінематичного і динамічного пропагаторів. Розроблений алгоритм включений в якості підсистеми в автоматизовану систему кількісної комплексної інтерпретації геолого-геофізичних даних GCIS. Проведений обчислювальний експеримент показав адекватність і обчислювальну ефективність отриманого розв'язку в співставленні з традиційним сітковим методом розв'язування прямої динамічної задачі.

Ключові слова: кінематичний пропагатор, динамічний пропагатор, сейсморозвідка, пряма задача, променева теорія.

USING THE KINEMATIC AND DYNAMIC PROPAGATORS FOR OBTAINING THE APPROXIMATE SOLUTION OF DIRECT DYNAMIC PROBLEM OF SEISMIC EXPLORATION

Petrovskyy O.P., Kropyvnytskiy Y.M.

An effective algorithm is suggested for obtaining the approximate solution of direct dynamic problem of seismic exploration, using a theory of kinematic and dynamic propagators. The developed algorithm has been included as a subsystems in automated system of quantitative complex interpretation of geologic and geophysical data GCIS. The modeling experiment has shown the adequacy and efficiency of the solution as was compared to traditional grid method of solving the direct dynamic problems.

Key words: kinematic propagator, exploration seismology, direct problem, ray theory.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м Івано-Франківськ, Україна

Надійшла 01.08.2013