

Упругая сейсмическая инверсия на основе точного решения системы уравнений Цёппритца

Дмитрачков Д.К., Протасов М.И.
ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия
dmitrachkovdk@ipgg.sbras.ru

Сейсмическая инверсия позволяет строить детальные модели упругих свойств среды по результатам обработки сейсмических данных во временной области [1]. В отличие от акустической инверсии, упругая инверсия работает с данными до суммирования. Благодаря этому из данных удаётся извлекать информацию о скоростях продольных и поперечных волн и плотности среды. С другой стороны, для ненулевого угла падения волны зависимость коэффициента отражения от свойств среды даётся системой уравнений Цёппритца в виде

$$Z(m)R = y(m), \quad (1)$$

где

$$Z(m) = \begin{pmatrix} -\sin \theta_{ip} & -\cos \theta_{rs} & \sin \theta_{tp} & \cos \theta_{ts} \\ \cos \theta_{ip} & -\sin \theta_{rs} & \cos \theta_{tp} & -\sin \theta_{ts} \\ -\rho_1 v_{p1} \cos 2\theta_{rs} & \rho_1 v_{s1} \sin 2\theta_{rs} & \rho_2 v_{p2} \cos 2\theta_{ts} & -\rho_2 v_{s2} \sin 2\theta_{ts} \\ \frac{\rho_1 v_{s1}^2 \sin 2\theta_{ip}}{v_{p1}} & \rho_1 v_{s1} \cos 2\theta_{rs} & \frac{\rho_2 v_{s2}^2 \sin 2\theta_{tp}}{v_{p2}} & \rho_2 v_{s2} \cos 2\theta_{ts} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$R = \begin{pmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{pmatrix}, \quad y(m) = \begin{pmatrix} \sin \theta_{ip} \\ \cos \theta_{ip} \\ \rho_1 v_{p1} \cos 2\theta_{rs} \\ \frac{\rho_1 v_{s1}^2 \sin 2\theta_{ip}}{v_{p1}} \end{pmatrix}.$$

Углы отражения и преломления связаны законом Снеллиуса в виде

$$\frac{\sin \theta_{ip}}{v_{p1}} = \frac{\sin \theta_{rs}}{v_{s1}} = \frac{\sin \theta_{tp}}{v_{p2}} = \frac{\sin \theta_{ts}}{v_{s2}}, \quad (3)$$

где θ_{rs} , θ_{tp} и θ_{ts} — углы отражения обменной поперечной волны, преломления продольной волны и преломления обменной поперечной волны соответственно. Система уравнений (1) задаёт коэффициент отражения R_{pp} как неявную функцию, зависящую от шести упругих параметров среды.

Для упрощения работы с системой уравнений были предложены аппроксимации точного решения [2, 3]. Они задают линейную связь между упругими свойствами среды и коэффициентом отражения, однако справедливы для слабоконтрастных сред и малых углов падения.

В данной работе рассматривается использование точного решения уравнений Цёппритца для расширения области применимости упругой инверсии. Предложенный метод сравнивается с классическим подходом на основе аппроксимаций на примерах реалистичных синтетических моделей. Минимизация проводится с помощью квазиньютоновского метода, а для вычисления градиента к системе уравнений Цёппритца применяется аппарат производной неявной функции. Проводится сравнение упругой инверсии с акустической. На примере акустической инверсии демонстрируется влияние регуляризирующих слагаемых в целевом функционале на решение обратной задачи и применение алгоритма выбора параметров регуляризации [4]. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 21-71-20002-П.

Список литературы

1. *Russell B.H., Hampson D.P.* Comparison of poststack seismic inversion methods // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. 1991. P. 876–878.
2. *Bortfeld R.* Approximation to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves // Geophysical Prospecting. 1961. V. 9. P. 485–502.
3. *Shuey R.* A simplification of the Zoeppritz equations // Geophysics. 1985. V. 50. No. 4. P. 609–614.
4. *Belge M., Kilmer M.E., Miller E.L.* Efficient Determination of Multiple Regularization Parameters in a Generalized L-Curve Framework // Inverse Problems. 2002. No. 18. P. 1161–1183.