

“Time Reverse Modeling” в среде с затуханием на примере модели Фойгта

*Мокшин Е.В., Бережной Д.В., Биряльцев Е.В.
(Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Россия)*

“Time Reverse Modeling” in attenuating media like Voigt model

*Mokshin E.V., Berezhnoi D.V., Biryaltsev E.V.
(Kazan (Volga Region) Federal University, Russia)*

Рассматриваются вопросы восстановления местоположения источника в вязко-упругой среде, используя технику реверсирования сигналов по времени. Рассматривается воздействие коэффициента затухания на точность обнаружения источника возмущения. Расчет проводится на основе МКЭ.

В настоящей работе рассматривается методика конечно-элементного расчета однородной среды с точечным источником, находящимся на некоторой глубине. Ставится обратная задача, целью которой является определение местоположения источника возмущения по результатам сейсмологических наблюдений на поверхности.

Известны подходы, к решению данной задачи основанные на технологии реверсирования сигнала по времени [1]. Гаевский и Тессмер реализовали эту методику для сейсмического события, выполнив численное моделирование методом Фурье [2]. Затем Штейнер использовал технологию для упругой среды, учтя P и S волны и проведя расчеты методом конечных разностей [3].

В рамках данного доклада метод реверсирования сигналов по времени был применен в вязко-упругой среде. В качестве модели среды была принята модель Фойгта. Цель исследования – определить отличия между случаями модели с затуханием и без затухания.

Будем придерживаться вариационной постановки задач МКЭ: либо как задач минимизации функционала энергии, либо как решение вариационных уравнений равновесия (движения) [4].

В качестве исходного принималось вариационное уравнение для исследования динамического деформирования в виде

$$\rho \ddot{\mathcal{U}} - \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{0} \quad \text{в } \mathcal{V},$$

где ρ - удельная плотность, \mathcal{U} - вектор перемещений, V - объем тела, S - поверхность тела, $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ - приведенный вектор деформаций, $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ - приведенный вектор напряжений, $\{\boldsymbol{Q}\}$ - вектор массовых сил и $\{\boldsymbol{P}\}$ - вектор поверхностных сил, действующий на части поверхности $\{S_{\boldsymbol{\sigma}}\}$.

В качестве модели среды была принята модель Фойгта, у которой зависимость между напряжениями и деформациями имеют вид



где $[D]$ - матрица упругих постоянных, α - коэффициент демпфирования.

На разработанном программном комплексе [5] было произведено численное моделирование процесса обнаружения точечного источника. Для этого решались прямая и обратная задача.

При решении прямой задачи область численного моделирования имела размер 30 км по простиранию и 40 км в глубину. Расчет проводился методом конечных элементов по явной схеме интегрирования матричных уравнений движения с шагом по времени 0,0005 сек. Среда однородная размер конечных элементов 20 x 20 м. Модельное время составило 3 секунды. В качестве источника возбуждения внутри модели прикладывалась сила в течение одного шага моделирования. Записывались значения скорости вертикальных и горизонтальных перемещений на верхней границе расчетной области. Распределение пикетов точек записи, в количестве девятнадцати, с 13200 метра в правую сторону модели с расстоянием между пикетами 200 метров. Различные механические характеристики приведены в табл. 1.

Скорость продольных волн	Скорость продольных волн	Плотность	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона
$V_p, \frac{м}{с}$	$V_s, \frac{м}{с}$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$E, Па$	ν
4251,723	2125,862	2500	30128580994	0,333

Табл. 1. Механические характеристики модели

На рис. 1а приведено распределение волн сжатия от источника возмущения при прямом моделировании, $t = 0,02$ сек.

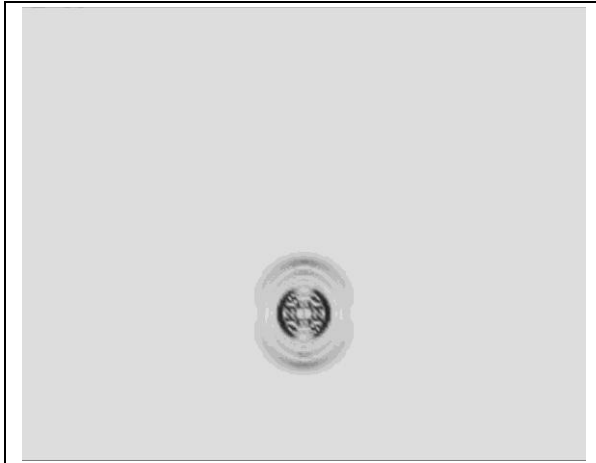


Рис. 1. Прямое моделирование

В обратной задаче полученные сигналы инвертировались по времени и использовались в качестве источников возбуждения, в месте расположения соответствующих приемников. Область численного моделирования и свойства среды были такими же, как и в прямой задаче. Модельное время также составило 3 секунды. К концу времени моделирования, т.е. при $t = 3$ сек. волны сошлись в темную область, совпадающую с местом расположения первоначального источника возмущения.

В вязко-упругой среде ослабление сигнала прямо пропорционально частоте. Для восстановления истинной частотной картины рассматривалось применение ряда приемов. Исследовались возможности изменения коэффициента затухания модели и применения специальных фильтров к зарегистрированным сигналам.

Получена оценка влияния коэффициента затухания среды на размеры области локализации. Исследовалось три подхода. В первом случае в обратном моделировании применялся отрицательный коэффициент затухания, что вызвало расхождение расчетной модели. Во втором случае при моделировании обратной задачи значение затухания соответствовало затуханию в прямой задаче (Рис. 2а). Было выявлено, что это ведет к размытию фокусируемой области. В третьем подходе значение коэффициента обнулялось. Это привело к сужению области локализации вокруг источника возмущения (Рис. 2б).

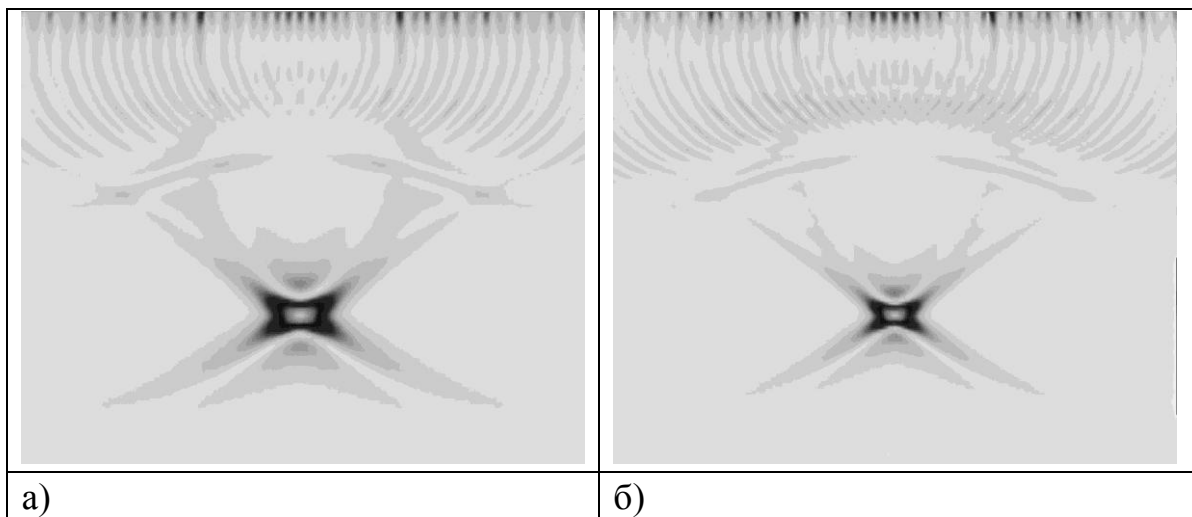


Рис. 2: а) Коэффициент затуханию, как и в прямой задаче, б) Нулевой коэффициент затухания

Было рассмотрено применение полосового, низкочастотного, интегрирующего и дифференцирующего фильтров к исходным сигналам.

На рис. 3 иллюстрируется случай применения полосового фильтра, запрограммированного в программе Matlab, с полосой пропускания 64Гц — 128Гц. Обнаружилось, что его использование ведет к росту постороннего шума и ухудшает точность локализации.

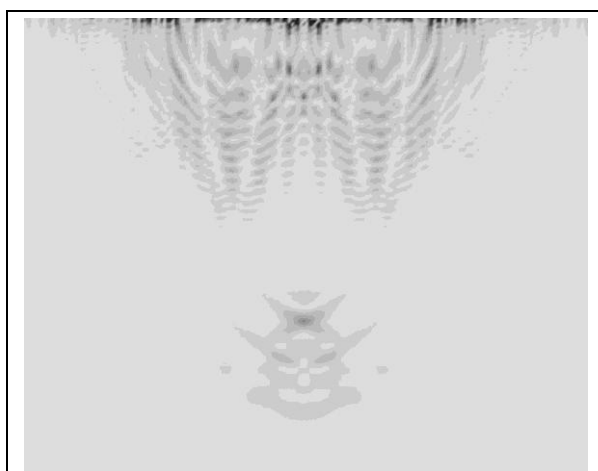


Рис. 3. Полосовой фильтр

Был рассмотрен интегрирующий фильтр, т. е. полученные сигналы были проинтегрированы по времени и низкочастотный фильтр, с окном пропускания 0,1Гц — 50Гц. Выяснилось, что эти фильтры увеличивают фокусируемую область (Рис 4а, 4б).

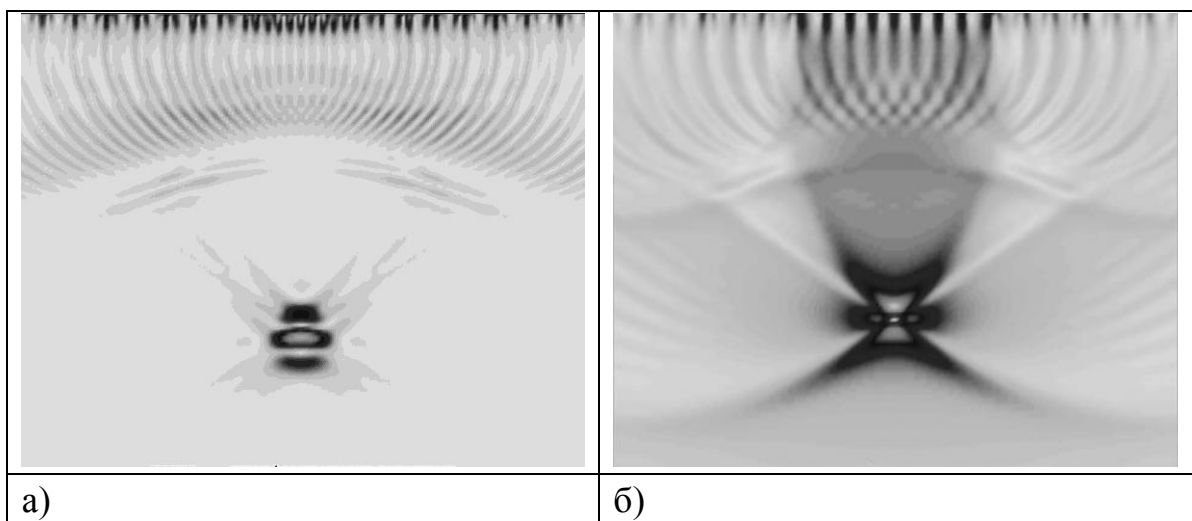


Рис. 4: а) Низкочастотный фильтр, б) Интегрирующий фильтр

Применение дифференцирующего фильтра, т. е. дифференцирование принимаемых сигналов по времени, способствует компенсации затухания сигнала и минимизации области локализации (Рис. 5).

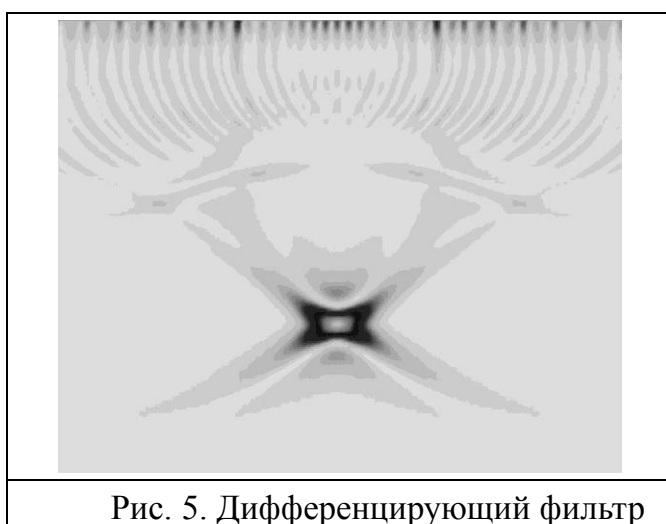


Рис. 5. Дифференцирующий фильтр

По результатам выявлено, что технология “Time Reverse Modeling” в вязко-упругой среде с затуханием принципиально работоспособна. Область локализации при обратном моделировании является идентифицируемой и точно совпадает с местом расположения первоначального источника возмущения. Оптимальная зона локализации источника получается при использовании нулевого коэффициента затухания при обратном моделировании. Применение дифференцирующего фильтра уменьшает фокусируемую зону и тем самым повышается точность нахождения местоположения источника.

Литература

1. M. Fink, Time reversed acoustics, *Physics Today* 50, 34, 1997.
2. Gajewski, D. & Tessmer, E., Reverse modelling for seismic event characterization, *Geophys, J. Int.*, 163, 276-284, 2005.
3. <http://www.spectraseis.com/jahia/webdav/site/spectraseis/shared/publications/PhDSteinerBrian_Onlineversion.pdf>, Steiner B. Time reverse modeling of low-frequency tremor signals, "A dissertation submitted to the degree of Doctor of Natural Sciences" Zurich, 2009.
4. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел / А.Голованов, Д.Бережной. - Казань: Издательство «ДАС», 2001. – 300 с.
5. Галимов М.Р., Биряльцев Е.В. Некоторые технологические аспекты применения высокопроизводительных вычислений на графических процессорах в прикладных программных системах, *Вычислительные методы и программирование Т 11*, 77, 2010.