
АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.222

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЕЕ ИСТОЧНИКА

© 2025 г. А. В. Лебедев^{а,*}, С. А. Манаков^{а,**}, Д. В. Дубовой^а

^аИнститут прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: swan@ipfran.ru

**e-mail: manakovsergej@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2024 г.

После доработки 28.06.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Рассматривается возможность использования дисперсии волны Рэлея для локализации источника сейсмоакустического излучения. Компенсация дисперсионных искажений составляет суть хорошо известных методов обращения волнового фронта или методов обращения времени. Особенностью представленного решения является использование *измеренной* в процессе регистрации сейсмоакустического сигнала дисперсионной зависимости с последующей обработкой полученных данных. Представлен пример такой обработки для экспериментальных данных, полученных в натуральных условиях. Результаты указывают на перспективность развития предложенного метода интерпретации данных для решения задач сейсмоакустической дистанционной диагностики природных сред, например, для поиска и локализации различного рода включений.

Ключевые слова: метод обращения времени, дисперсия рэлеевской волны

DOI: 10.31857/S0320791925010132, **EDN:** BPTYWY

ВВЕДЕНИЕ

В задачах дистанционной волновой диагностики вопрос поиска источника по результатам измерения сейсмического или акустического отклика представляет значительный интерес. Решение таких задач связано с построением акустических изображений сред, диагностикой дефектов в материалах, ультразвуковой медицинской диагностикой и т.п. В общем виде задача локализации источника акустического излучения, помещенного в неоднородную среду, представляет собой задачу обращения времени [1, 2]. Как отмечается в обзорной статье [1], для решения подобных задач требуется стационарность параметров распространения, взаимность относительно пространственных координат или симметрия функции Грина относительно координат источника и приемника, а также отсутствие сильного поглощения вдоль трассы распространения волн (рассматриваются адиабатические волновые процессы). В большинстве случаев, представляющих практический интерес, эти требования выполняются с приемлемой точностью. Реализация обращения времени в акустике связана с использованием обратимых преобразователей,

размещенных на окружающей источник поверхности. После того, как осуществлена запись принятого от источника сигнала, эта запись воспроизводится в обратной последовательности, и максимум поля (например, давления) имеет место в области локализации источника. В статье [1] отмечается, что выполнение такой процедуры позволяет учесть все возмущения, вызванные рассеянием на неоднородностях вдоль трассы распространения. Это оказывается принципиально важным для решения задач акустической диагностики дефектов в материалах, где рассеяние на микроскопических неоднородностях маскирует эхо сигнал от дефекта (подробнее в [1]). Различные приложения метода обращения волнового фронта, включая акустические, рассмотрены в книге [2].

Одним из примеров использования обращения времени являются задачи распространения в океанических волноводах, для которых характерно сильное дисперсионное размытие излучаемых сигналов. Сложность волновой картины распространения сигнала в морских условиях приводит к необходимости использования метода согласованной фильтрации, который позволяет оценить местоположение гидроакустического источника

с приемлемой точностью (см., например, одну из первых работ по теме [3]). В дальнейшем появилось много работ, посвященных компенсации рассеяния, фокусировке на источник акустического излучения с использованием методов согласованной фильтрации и обращения времени в гидроакустических, биологических и диагностических приложениях (например, [4–14]). Вопрос влияния нестационарности трассы распространения звука в океаническом волноводе и возникающих вследствие этого ограничений на дальность расположения источника рассмотрен в [15].

Отдельно следует упомянуть работы, использующие обращение времени для оценки характеристик среды распространения, поиска углеводородов и т.п. диагностических задач при использовании природных шумовых источников [16, 17]. Если функция Грина известна, то задача локализации источника решается путем сравнения принятого сигнала с вычисленным (по существу метод согласованной фильтрации), что при наличии вклада нескольких мод одномерного волновода или резонатора приводит к удовлетворительной оценке координат источника [18, 19]. Фактически, как показано в [19], точность оценки определена главным образом соотношением сигнал/шум, а не длиной волны, как в задачах инверсии времени [1]. Пример использования формализма функций Грина в экспериментальной локализации дефекта в виде трещины, являющейся источником нелинейного рассеяния, представлен в [20]. Теоретическое описание соответствующих методов нелинейной акустической диагностики с использованием обращения времени представлено в [21–23].

О важности задач локализации источников акустического излучения и спектре решаемых задач говорит специальный выпуск JASA в 2019 г. В статье [24] рассматривается задача локализации движущихся наземных транспортных средств при помощи набора пассивных приемников и с использованием особенностей акустического сигнала. Для решения задачи использован метод формирования диаграммы направленности (beam-forming) с соответствующей обработкой данных для подавления посторонних шумов. В статье [25] рассматривается задача локализации движущегося автономного подводного аппарата и восстановление его траектории при использовании одиночного приемника. Для решения задачи локализации автономного подводного аппарата используется сравнение измеренного и вычисленного импульсных откликов посылаемого акустического сигнала с борта аппарата. В статье [26] рассматривается задача акустической регистрации выстрелов артиллерии, где свойства принятых акустических сигналов определяются калибром, типом снаряда и волнами, возникающими при его разрыве. Особенности использования акустических методов для решения

прикладных задач локализации источников шума от военной техники более подробно рассмотрены в обзорной работе [27], опубликованной в том же 2019 г. В статьях [28, 29] приведены примеры экспериментальной проверки эффективности работы нейронных сетей для реализации алгоритма согласованной фильтрации, имеющей целью локализацию источников акустического излучения в мелком море или мелком замкнутом водоеме. Показано, что результаты использования нейронных сетей по эффективности сопоставимы с получаемыми регулярными методами согласованной обработки данных. В статье [30] рассмотрен вопрос о локализации источника гидроакустического излучения в мелком море при наличии изменчивости глубины по трассе распространения излучения. Согласование измеренных и вычисленных данных осложняется изменчивостью характеристик трассы распространения акустического сигнала.

Распространение зондирующих акустических волн сопровождается их дисперсией, которая приводит к размыванию импульсного отклика и снижению разрешающей способности дистанционной диагностики. Вопрос компенсации дисперсионных искажений с использованием нелинейных четырех-волновых преобразований рассматривался в оптике [31]. Там же отмечалось, что наряду с четырех-волновыми преобразованиями возможно использование других нелинейных преобразований, например, трех-волновых. Пример экспериментальной реализации метода обращения волнового фронта на трех-волновом нелинейном взаимодействии в акустике представлен в статье [32]. По существу обращение волнового фронта, продемонстрированное теоретически и экспериментально в [31, 32], аналогично процедуре инверсии времени, что отмечено в [1]. Метод компенсации дисперсионных искажений [31] и ему подобные имеют ограничение на полосу частот и могут быть реализованы для случая узкополосных зондирующих волн.

Анализ дисперсии поверхностных волн Рэлея, Лява и т.п. лежит в основе методов SASW/MASW (Spectral Analysis of Surface Waves/Multichannel Analysis of Surface Waves) [33, 34], показавших свою высокую эффективность для реконструкции зависимости скорости сдвиговой волны от глубины. По существу эти методы стали стандартными при проведении сейсмоакустических исследований с использованием поверхностных волн. Совместный анализ горизонтальных и вертикальных проекций вектора колебательной скорости расширяет возможности SASW/MASW, позволяя реконструировать профиль не только сдвиговой, но и продольной волны [35]. Поскольку в методах SASW/MASW дисперсия поверхностной волны Рэлея *измеряется*, возникает желание использовать эту информацию для оценки расстояния между источником и приемником.

Публикация посвящается памяти выдающегося акустика СССР и России В.А. Зверева, который уделил много времени анализу акустических приложений метода обращения времени [8–12] и оказал существенное влияние на своих коллег по ИПФ РАН, включая авторов представленной публикации. Статья организована следующим образом. В разделе 1 дано краткое описание математической модели, лежащей в основе оценки расстояния до источника с использованием измеренной дисперсионной зависимости фазовой скорости волны Рэлея. В разделе 2 представлен анализ экспериментальных данных, полученных на полигоне “Безводное” ИПФ РАН при регистрации сейсмических сигналов от импульсного источника (удара) с помощью цифровых сейсмостанций. В разделе 3 обсуждаются полученные результаты и подведен итог выполненного исследования.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В иллюстративных целях начнем рассмотрение с максимально простой модели, которая поясняет идею. Предположим, имеется набор всего из двух сейсмических приемников и источник, расположенный на линии, соединяющей приемники. Для определенности предположим, что сейсмические приемники представляют собой геофоны, регистрирующие вертикальную проекцию вектора колебательной скорости свободной поверхности. Такая схема расположения отвечает простейшей из возможных реализаций спектрального метода анализа поверхностных волн (SASW) [33].

Рассмотрим сигналы $f_{1,2}(t)$, распространяющиеся в виде поверхностной волны Рэлея и принимаемые сейсмическими приемниками, расположенными на удалении от источника. В силу линейности рассматриваемой задачи эти сигналы могут быть представлены в виде интегралов Фурье:

$$f_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \exp\left[-i\omega\left(t - \frac{r_n}{V(\omega)}\right)\right] d\omega, \quad (1)$$

где $S(\omega)$ — спектральная плотность амплитуд первичного источника с учетом его типа, r_n — расстояние от источника до приемника с номером $n = 1, 2$, $V(\omega)$ — фазовая скорость волны Рэлея.

Сделаем короткое примечание относительно (1).

Величина $\exp\left(+i\frac{\omega r_n}{V(\omega)}\right)$ есть не что иное, как функция Грина $G(\omega, r_n)$ источника волны Рэлея. Для источника в виде вертикальной силы следовало бы заменить экспоненту на функцию Ханкеля первого рода нулевого порядка (см., например, в [36]). Мы предположим, что подлежащие определению расстояния r_n много больше самой большой длины волны, и поэтому функцию Ханкеля возможно заменить на ее высокочастотную асимптотику, а фазовый множитель вида $\exp(-i\pi/4)$ может

быть включен в $S(\omega)$ под интегралом (1). Наличие такого фазового множителя, не зависящего от частоты, очевидно, никак не повлияет на положение максимума огибающей сигнала $f_n(t)$. Корневую зависимость амплитуды волны Рэлея от расстояния можно либо учесть в $S(\omega)$, либо пренебречь этой зависимостью для больших расстояний от источника до приемника, поскольку компенсация дисперсионных искажений связана в первую очередь с фазовым множителем под интегралом (1).

В отсутствие дисперсии $V(\omega) = V_0$ и величина r_n / V_0 от частоты не зависит, определяя запаздывание сигнала, вызванное распространением волны вида $\mathcal{F}(t - r_n / V_0)$. Ширина импульса $f_n(t)$ определяется спектром источника

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

и не зависит от r_n .

Если имеется дисперсия волны Рэлея, и зависимость $V(\omega)$ нам известна, то неизвестное расстояние r_n можно определить, подбирая величину \tilde{r} в выражении

$$\tilde{f}_j(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \exp\left[-i\omega\left(t - \frac{|r_n - \tilde{r}|}{V(\omega)}\right)\right] d\omega \quad (3)$$

таким образом, чтобы получить на выходе минимальную длительность огибающей $f_n(t)$. Нетрудно видеть, что эта процедура, с одной стороны, является разновидностью метода согласованной фильтрации, а с другой, — отвечает зеркалу фазового сопряжения [31].

Продемонстрируем метод локализации источника сейсмоакустического излучения, включая измерение $V(\omega)$, на простом численном примере. Пусть имеется двухслойная модель упругого полупространства, граница которого является свободной. Предположим, что источником является вертикальная сила, которая излучает линейно-модулированный по частоте (ЛЧМ) сигнал в полосе частот, где проявляется дисперсия волны Рэлея. Напомним, что дисперсия волны Рэлея обусловлена зависимостью глубины ее проникновения от частоты, и поэтому скорость волны на низких частотах будет определяться свойствами глубинного слоя, а на высоких — верхнего слоя. Для определенности зададим следующие параметры (плотность, скорость продольной и поперечной волн): $\rho_1 = 1.5 \text{ г/см}^3$, $V_{1P} = 300 \text{ м/с}$, $V_{1S} = 150 \text{ м/с}$ для верхнего слоя и $\rho_2 = \rho_1$, $V_{2P} = 410 \text{ м/с}$, $V_{2S} = 205 \text{ м/с}$ для полупространства. Границу раздела слоя и полупространства расположим на глубине $h = 2.8 \text{ м}$. Параметры приблизительно соответствуют данным для полигона “Безводное” ИПФ РАН [37] (смотри также рис. 5 в разделе 2).

Вычисленная дисперсионная зависимость показана на рис. 1. Светло-серым цветом отмечена

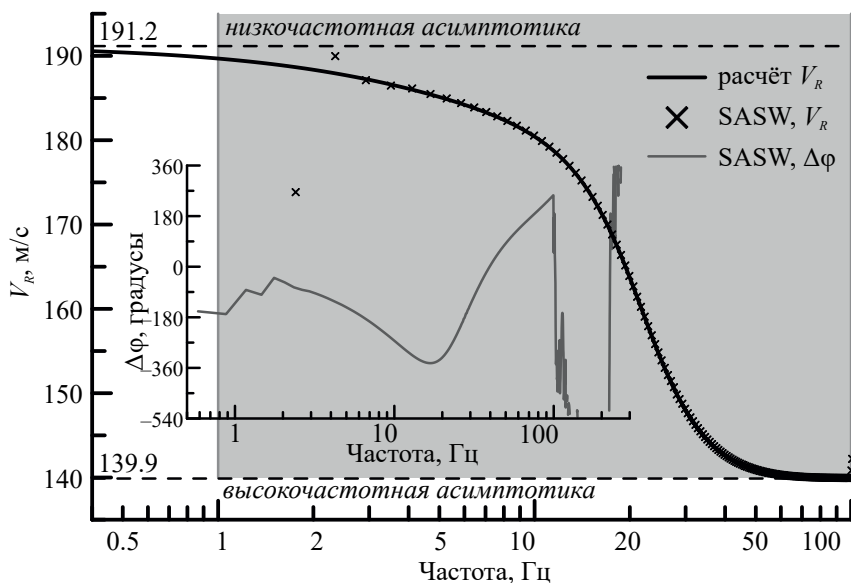


Рис. 1. Дисперсия фазовой скорости волны Рэлея для рассматриваемой модельной задачи.

полоса ЛЧМ сигнала (1–100 Гц), излучаемого силовым источником в рассматриваемой модели. Здесь же на рис. 1 дана иллюстрация идеи алгоритма SASW [33], когда зависимость фазовой скорости волны Рэлея от частоты вычисляется по частотной зависимости фазы взаимного спектра сигналов с двух приемников. Именно эта простота реализации обеспечила популярность и широкое распространение алгоритмов спектральных методов анализа поверхностных волн в двухканальной (SASW) и многоканальной (MASW) реализациях. На вставке для большей наглядности показана зависимость разности фаз за вычетом линейной зависимости от частоты (вклад дисперсии волны). Вне полосы излучения видны погрешности (влияние шума вычислений).

Длина волны Рэлея на частоте 1 Гц составляет приблизительно 200 м, на частоте 100 Гц — 1.5 м. Смоделируем схему размещения пары приемников для реализации алгоритма измерения частотной зависимости фазовой скорости методом SASW по фазе взаимного спектра сигналов $f_1(t)$ и $f_2(t)$. Ясно, что для максимальной точности измерения разности фаз $\Delta\varphi = \omega|r_2 - r_1| / V(\omega)$ расстояние между приемниками должно быть, с одной стороны, максимально возможным, а, с другой, — исключать неоднозначность фазы в области низких частот. С учетом этих требований зададим $r_1 = 500$ м и $r_2 = 550$ м. Для расчета импульсных откликов воспользуемся алгоритмом [38].

Дисперсионное размытие хорошо видно на рис. 2, где представлены нормированные на максимальные амплитуды огибающие импульсных откликов в полосе излучаемых источником частот. Для сравнения жирной черной линией здесь

же показана огибающая импульсного отклика на расстоянии 500 м в отсутствие дисперсии, когда толщина слоя в модельной среде $h = 0$. Ширина импульса отвечает полосе частот излучения (2) и составляет 16.2 мс (временной интервал между вертикальными маркерами на рис. 2). Отклики для $r_1 = 500$, $r_2 = 550$ м сильно размыты из-за дисперсии скорости волны Рэлея (1). Времена прихода, оцениваемые как отвечающие максимуму огибающей сигнала, показаны вертикальными штриховыми линиями. Из-за того, что примерно половина полосы частот излучаемого сигнала (50–100 Гц) отвечает высокочастотной асимптотике дисперсионной зависимости $V(\omega)$, оценка скорости распространения волны по времени прихода максимумов огибающих импульсных откликов для $r_{1,2}$ соответствует скорости волны Рэлея в области высоких частот и составляет приблизительно $V \approx 139$ м/с (сравни с данными рис. 1). Оценка расстояния по времени прихода максимума огибающей и скорости V составит $r_1 \approx 509$ м, т.е. определена с ошибкой почти в 10 м.

Временные отсчеты на оси абсцисс рис. 2 отвечают условию синхронизации приемника и источника, когда нулевое значение времени отвечает местоположению источника. Синхронизация приемников с источником не всегда возможна. Поэтому выполним оценку расстояния из условия минимума длительности импульсного отклика, когда абсолютное значение времени прихода импульса не известно (произвольное значение начала отсчета на оси времени). На рис. 3 представлена зависимость длительности огибающей импульсного отклика от пробной величины расстояния \tilde{r} в выражении (3). Горизонтальная штриховая линия отвечает

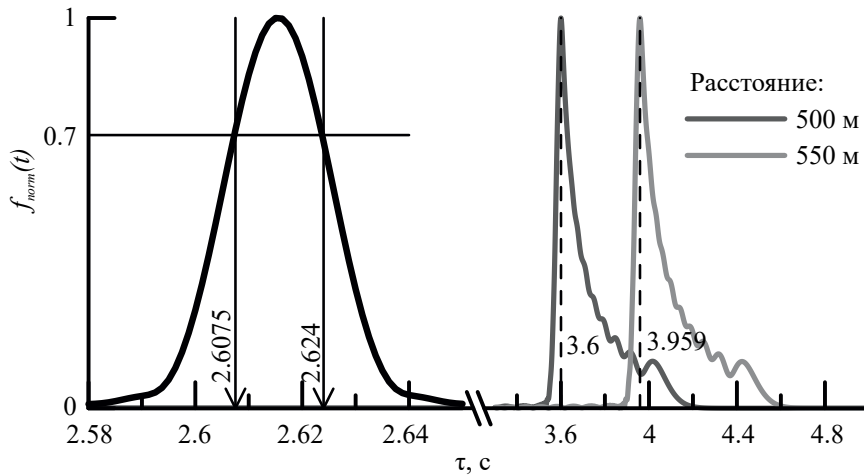


Рис. 2. Иллюстрация дисперсионного размывания импульсного отклика волны Рэлея в модельной среде.

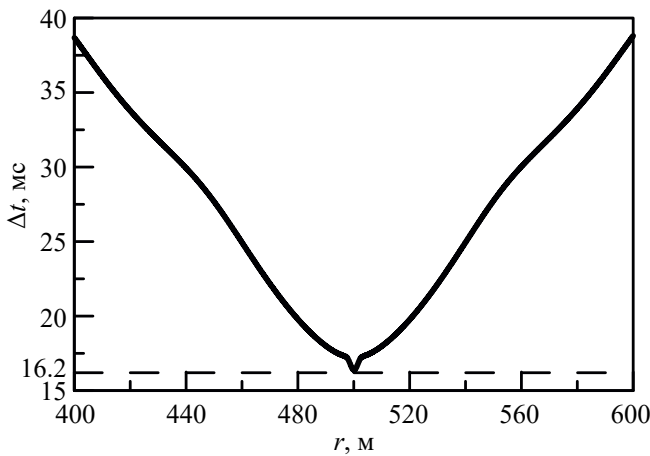


Рис. 3. Зависимость длительности огибающей импульсного отклика от пробного значения расстояния. Штриховой линией показано значение, отвечающее полосе излучаемых частот.

длительности импульсного отклика 16.2 мс (отражена на рис. 2), которая определяется шириной полосы излучаемых частот. Как следует из данных рис. 3, минимум длительности импульсного отклика достигается при $\tilde{r} = 500$ м, что соответствует заданному расстоянию. При этом минимум ярко выраженный, и поэтому точность оценки \tilde{r} составляет примерно один метр: фактически погрешность \tilde{r} определяется шириной полосы излучаемых частот и средней скоростью волны Рэлея. Отметим, что в вычислениях не была использована никакая априорная информация, а дисперсионная зависимость оценивалась стандартными методами SASW/MASW (см. пример на рис. 1, а также рис. 5 в разделе 2).

Двухканальные схемы регистрации, впервые предложенные в [33] для реализации метода SASW, в настоящее время используются редко.

Для анализа спектра поверхностных волн предпочтительно использовать многоканальный вариант реализации (MASW). В этом случае наличие пространственно-временного спектра принятого сигнала ($f-k$ спектра [39]), представляющего собой распределение амплитуд в пространстве (ω, k) , позволяет достичь более высокой точности измерений. Рассмотрим задачу фокусировки на источник поверхностных волн в более общем виде, т.е. с точки зрения теории оценки параметров сигналов [40] или построения согласованного фильтра для анализируемой модели сигнала. Будем полагать, что 1) исходный сигнал есть дельта-функция (импульсный источник в нулевой момент времени), 2) в среде отсутствует затухание и не рассматривается геометрическая расходяемость волны, 3) сейсмический приемник регистрирует только вертикальную проекцию вектора смещения в волне Рэлея, 4) отсутствует эффект ближней зоны. В этом случае:

$$s_{nj} \equiv s_n(\omega_j) = \theta_0 \exp(ik_j r_n) + \xi_{nj}, \quad (4)$$

где $s_n(\omega_j)$ — сигнал на n -ом приемнике на j -ой частоте, θ_0 — амплитуда сигнала, $k_j = \omega_j / V_j$ — волновое число, V_j — скорость волны Рэлея на j -ой частоте, $r_n = |\tilde{\mathbf{r}}_n - \mathbf{r}_0|$ — расстояние между n -м приемником и источником, $\tilde{\mathbf{r}}_n$ — радиус-вектор n -го приемника, \mathbf{r}_0 — радиус-вектор источника, ξ_{nj} — аддитивный гауссов шум.

Выражение (4) можно представить в векторной форме:

$$\mathbf{s} = \theta_0 \hat{\mathbf{A}}(\mathbf{r}_0) + \boldsymbol{\xi}, \quad (5)$$

где \mathbf{s} — вектор столбец с элементами s_{nj} , упорядоченными по возрастанию индексов n, j , $\hat{\mathbf{A}}$ — матрица с элементами $\exp(ik_j r_n)$, где использовано такое же упорядочение по индексам n, j , как для \mathbf{s} .

Согласно [40] оптимальная оценка \mathbf{r}_0 — это значение, которое отвечает максимуму следующей функции:

$$F(\mathbf{r}_0) = \tilde{\mathbf{s}}^H \hat{\mathbf{A}} \left(\hat{\mathbf{A}}^H \hat{\mathbf{A}} \right)^{-1} \hat{\mathbf{A}}^H \tilde{\mathbf{s}}, \quad (6)$$

где $(\cdot)^H$ означает эрмитово сопряжение, $\tilde{\mathbf{s}}$ — принятый сигнал, который отвечает модели (5). Полученная оценка является оптимальной для аддитивного гауссового шума, т.е. имеет минимально возможную погрешность оценки \mathbf{r}_0 .

Для линейки приемников и одного источника, расположенного на ее оси x , выражение (6) принимает вид:

$$F(x_0) \sim \left| \sum_{n,j} s_{nj} \exp(-ik_j |x_n - x_0|) \right|^2. \quad (7)$$

Как правило, время включения импульсного источника неизвестно, и выражение (4) должно быть представлено в виде: $s_{nj} = \theta_0 \exp(+i(\omega_j t_0 + k_j r_n)) + \zeta_{nj}$, а выражение (7):

$$F(x_0, t_0) \sim \left| \sum_{n,j} s_{nj} \exp(-i\omega_j t_0) \exp(-ik_j |x_n - x_0|) \right|^2. \quad (8)$$

Выражение (8) эквивалентно свертке сигналов или приведенному выше выражению (3). Локализация источника по минимальной длительности Δt оказывается эквивалентной оценке максимума $F(x_0, t_0)$. В дальнейшем обработка многоканальных данных, полученных в эксперименте, производится оптимальным образом согласно (8).

2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент был проведен в 2011 г. на полигоне ИФП РАН “Безводное”. Схема расстановки измерительной аппаратуры показана на рис. 4. Цифровые сейсмостанции, связанные с компьютером, осуществляющим регистрацию данных на жесткий диск, не показаны.

В качестве источника использовался удар кувалдой по площадке, установленной на поверхности земли. Синхронно с ударом кувалды осуществлялся запуск цифровых сейсмостанций “Лакколит X-M2”. Частота квантования составляла 1000 Гц, частота фильтра низких частот была задана равной 250 Гц, длительность записи сейсмических сигналов для каждого удара 3.072 с. Геофоны располагались через 2 м друг от друга в линию, на продолжении которой помещался источник. Регистрировались вертикальная и горизонтальная (в направлении от источника) проекции вектора колебательной скорости поверхности земли. Всего

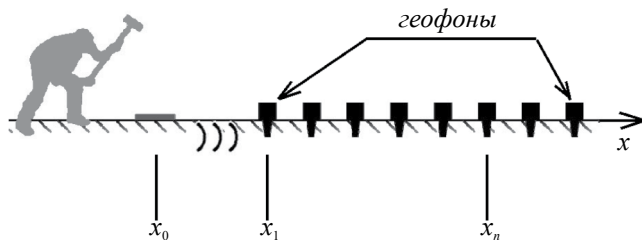


Рис. 4. Схема расстановки сейсмических приемников относительно импульсного источника в эксперименте 2011 г.

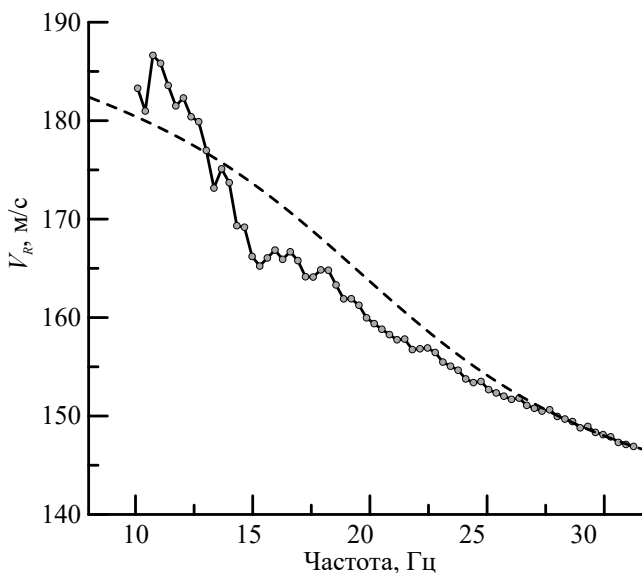


Рис. 5. Измеренная дисперсия скорости волны Рэля. Штриховая линия отвечает модельной зависимости (рис. 1)

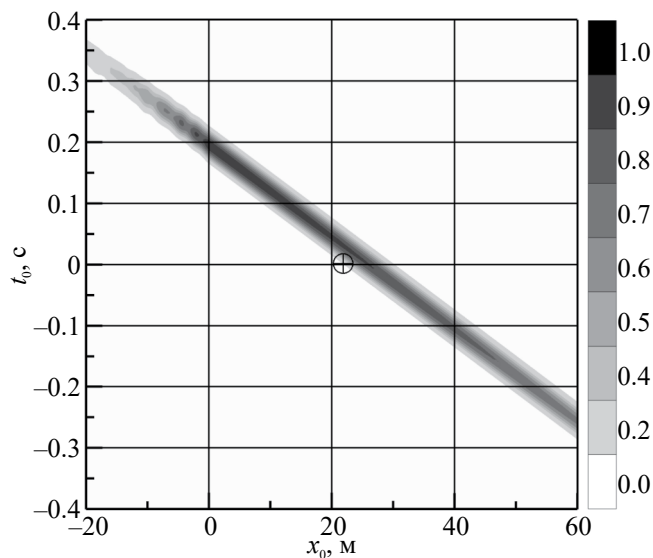


Рис. 6. Результат вычисления функции $F(x_0, t_0)$ по формуле (8). Символ на графике показывает истинное местоположение источника.

использовалось по 24 геофона для каждой из проекций. В дальнейшем используются данные только для вертикальной проекции, а координаты отсчитываются от источника, что позволяет задать $x_0 = 0$. Спектр импульса удара был локализован в полосе частот 10–40 Гц, наблюдалось эффективное возбуждение волны Рэлея на этих частотах.

Поскольку одним из условий применимости предложенного выше способа оптимальной обработки является отсутствие эффектов ближней зоны, из всех серий измерений выбрана та, где расстояние $x_1 = 22$ м. В этом случае расстояние от источника до ближайшего приемника превышает длину волны Рэлея для минимальной частоты излучения.

Измеренная дисперсионная зависимость представлена на рис. 5. Подробности описания процедуры обработки пространственно-временных спектров или f - k спектров (см., например, в [39]) опустим, имея в виду стандартный для метода MASW способ представления и анализа данных. Значения V_j , отвечающие данным рис. 5, использовались для вычислений по формуле (8). Здесь под x_0 понимается расстояние от источника до ближайшего к нему приемника ($x_1 - x_0$ на рис. 4).

В результате выполнения вычислений для набора x_0 и t_0 была построена функция $F(x_0, t_0)$, которая в нормированном на максимум этой функции виде показана на рис. 6. При вычислении $F(x_0, t_0)$ дополнительно использовалась нормировка на максимум по всем приемникам на каждой частоте. Таким образом, уменьшается влияние малого затухания и расширяется эффективная полоса частот, что приближает принятый сигнал к рассмотренной выше модели (4). Крестик внутри окружности на рис. 6 отвечает истинному положению источника при условии нулевой задержки в импульсном отклике геофонов. Нетрудно видеть, что максимум практически идеально расположен в точке $x_1 - x_0 = 22$ м при компенсации задержки $t_0 = 0$ за счет использования синхронизации записи с моментом удара. Небольшое смещение максимума по временной оси в область $t_0 \approx 0.05$ с можно связать с конечной длительностью импульсного отклика геофонов. Геофоны имеют резонансную частоту в окрестности $f_r \approx 15$ Гц, и запаздывание (длительность нарастания) можно оценить как $1 / f_r \approx 0.067$ с, что по порядку величины согласуется с данными рис. 6. Представленный на рис. 6 график функции $F(x_0, t_0)$ указывает на заметную погрешность локализации источника. В рассмотренном нами примере практической реализации предложенного метода дисперсия волны Рэлея (рис. 5) относительно невелика, составляя примерно 20%. Как нетрудно видеть из приведенного в разделе 1 анализа, метод локализации источника использует фазовую компенсацию, и поэтому точность локализации определяется девиацией фазы в рассматриваемой полосе частот.

Таким образом, в реальном эксперименте продемонстрирована компенсация дисперсионных искажений при распространении волны Рэлея и решение задачи поиска источника волн. Используемая процедура компенсации дисперсионного размывания волнового пакета по существу совпадает с хорошо известными решениями в оптических системах [31], а также решениями, полученными В.А. Зверевым для акустических волноводов [8–12]. Характерной особенностью решения, представленного в настоящей работе, является объединение алгоритмов обращения волнового фронта с прямыми измерениями дисперсии волны Рэлея методами SASW/MASW [33–35].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итог и выделим основные результаты выполненного исследования.

1. Рассмотрена возможность реализации идеи обращения волнового фронта при зондировании природных сред с помощью поверхностных волн Рэлея. На простом примере и с привлечением строгих методов построения оптимальных оценок параметров продемонстрированы физические принципы ее реализации.

2. Выполнен анализ экспериментальных данных, полученных в полевых условиях, которые максимально приближены к задачам дистанционной диагностики природных сред. Для этих данных продемонстрирована работоспособность предложенной процедуры обращения фронта рэлеевской волны.

Как отмечается во многих работах, посвященных обращению волнового фронта, использование алгоритмов обращения позволяет локализовать вторичные источники, возникающие при рассеянии на различного рода дефектах структуры исследуемой среды. В частности, авторы предполагают в дальнейшем использовать описанный выше алгоритм для анализа рассеяния волн Рэлея на поверхностных включениях, моделирующих карст и расслоение грунта, например, из-за развития оползневых процессов. Теоретическое описание такого рассеяния представлено в статье [41], результаты которой предполагается использовать при сопоставлении с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме FFUF-2024-0035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fink M. Time reversed acoustics // Phys. Today. 1997. V. 3. P. 34–40.
2. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 240 с.
3. Czerniak S.P., Krolik J.L. Robust wideband matched-field processing with a short vertical array // J. Acoust. Soc. Am. 1997. V. 101. № 2. P. 749–759.

4. Prada C., Manneville S., Spoliansky D., Fink M. Decomposition of the time reversal operator: Detection and selective focusing on two scatterers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. № 4. P. 2067–2076.
5. Mordant N., Prada C., Fink M. Highly resolved detection and selective focusing in a waveguide using the D.O.R.T. method // *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 105. № 5. P. 2634–2642.
6. Lingeitch J.F., Song H.C., Kuperman W.A. Time reversed reverberation focusing in a waveguide // *J. Acoust. Soc. Am.* 2002. V. 111. № 6. P. 2609–2614.
7. Sutin A.M., TenCate J.A., Johnson P.A. Single-channel time reversal in elastic solids // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 116. № 5. P. 2779–2784.
8. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
9. Зверев В.А. Обращение волн при импульсной локализации на просвет // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 4. С. 477–482.
10. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Численное временное обращение волн // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54. № 1. С. 69–76.
11. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Пространственная протяженность области акустического обращения волн // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54. № 5. С. 823–830.
12. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Модовое обращение волн для мелкого моря // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 1. С. 62–73.
13. Синельников Е.Д., Сутин А.М., Сарвазян А.П. Обращение времени в фокусирующих излучателях и приемниках ультразвука // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 2. С. 206–217.
14. Еремин А.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Ламмеринг Р. Локализация неоднородностей в упругой пластине методом обращения волн // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 5. С. 523–531.
15. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Любавин Л.Я. Фокусировка звуковых импульсов методом обращения времени на стокилометровых трассах в глубоком море // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 6. С. 723–732.
16. Steiner B., Saenger E.H., Schmalholz S.M. Time reverse modeling of low-frequency microtremors: Application to hydrocarbon reservoir localization // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L03307(1–7).
17. Гордин О.А., Кацнельсон Б.Г., Qin J., Brown M.G., Заботин Н.А., Zang X. Использование обращения волнового фронта для пассивного акустического зондирования океана // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 3. С. 283–295.
18. Бородина Е.Л., Митюгов В.В., Муякшин С.И., Турко А.Н. Обращение волнового фронта в акустическом волноводе // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 4. С. 437–447.
19. Бредихин В.В., Лебедев А.В. Реконструкция функции Грина в задачах резонансной акустической спектроскопии // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 3. С. 283–291.
20. Kazakov V.V., Sutin A.M., Johnson P.A. Sensitive imaging of an elastic nonlinear wave-scattering source in a solid // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. P. 646–648.
21. Van Den Abeele K., Johnson P.A., Sutin A.M. Non-linear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part I: Non-linear Wave Modulation Spectroscopy // *Res. Nondestr. Eval.* 2000. V. 12. № 1. P. 17–30.
22. Van Den Abeele K., Sutin A.M., Carmeliet J., Johnson P.A. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) // *NDT&E International.* 2001. V. 34. P. 239–248.
23. Лебедев А.В., Островский Л.А., Сутин А.М. Нелинейная акустическая спектроскопия локальных дефектов в геоматериалах // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 103–117.
24. Azimi-Sadjadi M.R., Srinivasan S.K., Ahmadinia S. Acoustic localization of vehicular sources using distributed sensors // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 6. P. 4913–4925.
25. Dubrovinskaya E., Casari P., Diamant R. Bathymetry-aided underwater acoustic localization using a single passive receiver // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 6. P. 4774–4789.
26. Dagallier A., Cheinet S., Cosnefroy M., Rickert W., Weßling T., Wey P., Juve D. Long-range acoustic localization of artillery shots using distributed synchronous acoustic sensors // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 6. P. 4860–4872.
27. Ferguson B.G. Defense applications of acoustic signal processing // *Acoustics Today.* 2019. Spring. P. 10–18.
28. Ferguson E.L., Williams S.B., Jin C.T. Convolutional neural network for single-sensor acoustic localization of a transiting broadband source in very shallow water // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 6. P. 4687–4698.
29. Yangzhou J., Ma Z., Huang X. A deep neural network approach to acoustic source localization in a shallow water tank experiment // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 6. P. 4802–4811.
30. Yang T.C. Source localization in range-dependent and time-varying shallow water: The Shallow Water 2006 experimental results // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 6. P. 4740–4753.
31. Yariv A., Fekete D., Pepper D.M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation // *Opt. Lett.* 1979. V. 4. № 2. P. 52–54.
32. Кустов Л.М., Назаров В.Е., Сутин А.М. Обращение волнового фронта акустической волны на пузырьковом слое // *Акуст. журн.* 1985. Т. 31. № 6. С. 837–839.
33. Nazarian S., Stokoe K.H., Hudson W.R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems // *Transp. Res. Rec.* 1983. V. 930. P. 38–45.
34. Miller R., Xia J., Park C.B., Ivanov J.M. The history of MASW // *The Leading Edge.* 2008. April. P. 568.
35. Лебедев А.В., Манаков С.А. Точность оценки параметров слоистой среды при использовании когерентного векторного приема поверхностной волны Рэлея // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 1. С. 68–82.

36. *Miller G.F., Pursey H.* The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid // *Proc. of the Royal Soc. (London)*. 1954. V. A223. P. 521–541.
37. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Манаков С.А., Таланов В.И.* Фазовый метод межскважинного профилирования на когерентных SH-волнах // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 5. С. 649–655.
38. *Лебедев А.В.* Анализ поверхностных волн в упругой среде с пористым насыщенным слоем // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2019. Т. 62. № 6. С. 469–489.
39. *Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж.* Обработка сейсмических данных, теория и практика. М.: Мир, 1989. 216 с.
40. *Турчин В.И.* Введение в современную теорию оценки параметров сигналов. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2005. 116 с.
41. *Лебедев А.В., Манаков С.А., Дубовой Д.В.* Рассеяние волны Рэлея на приповерхностном включении в упругом полупространстве // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2023. Т. 69. № 5-6. С. 483–504.

Use of Rayleigh Wave Dispersion to Localize its Source

A. V. Lebedev^a, S. A. Manakov^a, D. V. Dubovoy^a

^a*A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Ulyanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

The possibility of the use of the Rayleigh wave dispersion for the localization of the source of seismo-acoustic emission is investigated. Compensation for the dispersion distortion is at the heart of the well-known methods of wavefront reversal or time reversal methods. The peculiarity of the paper presented is the use of the dispersion dependence, which is *measured* during seismoacoustic signal recording, with subsequent processing of the data obtained. An example of such processing is presented for the data recorded in the field experiment. The results indicate on the prospectivity of developing the proposed method of data interpretation for seismoacoustic remote diagnostics of natural environments, e.g. for the search and localization of different types of inclusions.

Keywords: time reversal method, Rayleigh wave dispersion