

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 213

КОРРЕЛЯЦИОННО-ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

В.В.Семенов

Горький 1986

С е м ё н о в В.В.

КОРРЕЛЯЦИОННО-ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ. Горький, Препринт № 213/ НИРФИ, 1986.

УДК 550.34.04

В работе предложены корреляционно-фазовые методы обработки сейсмических сигналов, создаваемых вибрационными источниками. В результате такой обработки измеряются зависимости фазовой и групповой скоростей сейсмической волны от частоты сигнала и пространственных координат. Показана принципиальная возможность выделения типов волн и получения пространственно-частотных характеристик при измерениях в ближней зоне вибратора. Приведены результаты натуральных экспериментов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из подходов к изучению свойств сейсмических волн является представление процессов распространения в виде передачи сигналов через канал связи, имеющий комплексный коэффициент затухания, который зависит как от частоты сигнала, так и от координат источника и точек наблюдения. Как правило, в передающем канале одновременно распространяется несколько типов волн, и в общем случае сейсмический сигнал, принятый в точке с координатами $\vec{r}(x, y, z)$, может быть представлен в виде

$$f(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_i S_i(\vec{r}, \omega) \exp[i\omega(t - \tau_i(\vec{r}, \omega)) + i\psi_i(\omega)] d\omega, \quad (I)$$

где $S_i(\vec{r}, \omega)$ - амплитудный спектр, $\tau_i(\vec{r}, \omega)$ - фазовая задержка, $\psi_i(\omega)$ - фаза источника, находящегося в точке $\vec{r}_0(0, 0, 0)$, i - номер типа волны, моды или источника. Обработка сейсмических данных в зависимости от поставленной задачи связана с определением какой-либо из этих пространственно-частотных характеристик или их совокупности.

Рассмотрим задачу измерения фазовой задержки $\tau(\vec{r}, \omega)$, которая связана с волновым параметром $K(\omega)$ соотношением

$$\tau(\omega) = \frac{K(\omega) |\vec{r}|}{\omega}.$$

В последние годы вновь получает распространение метод тригармонической волны, предложенный в 1955 г. В.А.Зверевым для измерения дисперсии ультразвука в упругих стержнях /1/ и недавно применённый для исследования дисперсионных свойств гидроакустического волновода /2/.

В этом методе используется разложение волнового параметра в ряд по степеням частоты огибающей Ω в окрестности несущей частоты ω_0 амплитудно-модулированной волны и измеряется значение $d^2K(\omega_0)/d\omega^2$ в различных точках приёма. Такое приближение не всегда допустимо, например при исследовании дисперсионных зависимостей, у которых есть минимумы групповой скорости (фазы Эйри) /3/.

Единственным методом, позволяющим непосредственно определять волновой параметр $K(\omega)$ сейсмической волны, до настоящего времени был метод измерения разности фазовых спектров сигналов в двух или нескольких разнесенных точках приёма /4, 5/. Сигнал (I) в месте излучения имеет импульсный характер (взрыв, удар, землетрясение и т.д.), причём его база (произведение длительности T на ширину полосы ΔF) мала. Для того, чтобы получить достаточное число отсчетов в дисперсионной кривой, необходимо, чтобы база сигнала во много раз увеличилась, что возможно только на очень больших расстояниях от сейсмического источника. Это приводит к существенному ослаблению сигнала, появлению рассеянных, многократно отраженных волн, затуханию высокочастотных составляющих сигнала и т.д., что значительно уменьшает помехозащищенность фазового метода. Поэтому для повышения точности измерений приходится увеличивать расстояние между сейсмоприёмниками до десятков длин волн.

Известно, что дисперсию могут вызвать не только наличие волновода, но и неоднородности среды, в особенности, имеющие характерные размеры, сравнимые с длиной волны /6/. Поэтому представляет интерес исследовать не только частотную, но и пространственную зависимость скорости распространения волны, но в силу указанных выше причин детальные измерения затруднены.

В настоящее время разработаны и широко используются вибротсейсмические методы исследования, в которых излучается гармонический сигнал с медленно перестраиваемой частотой /7/. Достоинствами этих методов является возможность управления амплитудными и фазовыми спектрами возбуждения, а также большая база сигнала в ближней зоне вибратора. Однако для измерения фазовых спектров волны в различных точках приёма такие сигналы не применялись.

Во-первых, имеются определенные трудности в измерении разности фазовых спектров на фоне регулярно изменяющейся составляющей, обусловленной относительной задержкой сигналов. Во-вторых, волны различных типов, создаваемые вибратором в ближней зоне, перекрываются во времени.

Настоящая работа посвящена вопросам применения виброрейсейсмических методов и корреляционной обработки сигналов для измерения пространственных и частотных зависимостей фазовой и групповой скоростей волн в ближней зоне вибратора.

Описан метод измерения горизонтального распределения скоростей поверхностной сейсмической волны, основанный на использовании движущегося гармонического вибратора и измерения доплеровской частоты в сейсмическом сигнале. Далее рассматривается корреляционно-фазовый метод измерения фазовой и групповой скоростей поверхностной сейсмической волны с линейно изменяющейся частотой. Приведены результаты экспериментов, которые проводились на расстояниях порядка 10λ от вибратора. Затем в работе обсуждаются вопросы применимости разработанных методов в условиях многомодовости. Показана принципиальная возможность различения типов волн и раздельного для каждого типа измерения пространственной и частотной зависимости скоростей посредством двумерной оптической обработки получаемых в эксперименте коррелограмм.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Во многих задачах сейсмологии необходимо учитывать неоднородность среды вдоль горизонтальных координат. Характер неоднородности может быть изучен при измерении скорости распространения поверхностных волн в исследуемом слое, однако такие измерения традиционными импульсными методами /8/ весьма трудоемки, т.к. требуют расстановки большого количества сейсмоприёмников, особенно при мелкомасштабных неоднородностях.

Ниже приведено описание и результаты экспериментальной проверки корреляционного метода измерения фазовой скорости распространения поверхностной волны в зависимости от горизонтальных координат. Схема эксперимента приведена на рис. 1. В двух точках исследуемой неоднородной поверхности устанавливаются сейсмоприёмники, и от одного к другому с постоянной скоростью v_0 движется монохроматический (частота ω_0) источник вертикальной силы. Разность доплеровских частот принимаемых сигналов при условии $v_0 \ll c(x)$ равна, очевидно, $\Delta\omega_0 = 2\omega_0 v_0 / c(x)$, что соответствует закону изменения разности времен

$$\frac{\partial \Delta\tau}{\partial t} = \frac{2v_0}{c(x)}, \quad (2)$$

где $c(x)$ - скорость распространения волны в месте расположения вибратора в момент времени t . Соотношение (2) справедливо лишь в том случае, если на сейсмоприемник приходит один тип (или одна мода) волны, однако выполнение этого условия, как будет показано далее, можно контролировать в ходе эксперимента.

Измерение производной $\partial \Delta \tau / \partial t$ проводится посредством получения скользящей взаимной корреляционной функции сигналов сейсмоприемников /9/

$$R(\tau_k, t) = \int_t^{t+\tau} A_1(t' - \tau_1(t')) A_2(t' - \tau_2(t') + \tau_k) \times \cos [\omega_0(t' - \tau_1(t'))] \cos [\omega_0(t' - \tau_2(t') + \tau_k)] dt', \quad (3)$$

где $A_{1,2}(t)$ - амплитуды сигналов, $\tau_1(t)$ и $\tau_2(t)$ - времена распространения сигналов от вибратора до сейсмоприемников, t - момент времени нахождения вибратора в точке с координатой x , τ_k - задержка, вносимая корреляционным анализатором, τ - время интегрирования.

Интервал усреднения должен удовлетворять двум условиям. Первое условие $\tau \gg 2\pi/\omega_0$ необходимо для повышения эффективности оценки корреляционной функции и, следовательно, точности измерений. Второе условие требует, чтобы за время τ изменение разности фаз $\omega_0 [\tau_2(t) - \tau_1(t)]$ сигналов сейсмоприемников было много меньше 2π . В противном случае сигналы перестают быть коррелированными. Кроме того, интервал усреднения τ эквивалентен длине отрезка $L = v_0 \tau$, на котором будет определяться средняя скорость $\overline{c(x)}$ распространения волны, поэтому для выявления мелкомасштабных неоднородностей интервал τ следует уменьшать.

При одновременном выполнении обоих условий (а это, естественно, возможно за счет выбора скорости движения вибратора) корреляционная функция (3) приобретает простой вид

$$R(\tau_k, t) = \overline{A_1(t) A_2(t)}^T \cos [\omega_0(\tau_k - \Delta \tau(t))], \quad (4)$$

где $\Delta \tau(t) = \tau_2(t) - \tau_1(t)$, а горизонтальная черта означает усреднение по времени. Производная $\partial \Delta \tau / \partial t$ определяется следующим образом. Значения корреляционной функции (4) регистрируются на экране запомина-

щего осциллографа в виде зависимости яркости от координат τ_k и t . Эти осциллограммы имеют вид полос, чередующихся с периодом $2\pi/\omega_0$, причем линии, удовлетворяющие значениям $R(\tau_k, t) = 0$, соответствуют значениям $\tau_0 = \Delta\tau(t) \pm n\pi/\omega_0$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Тангенсы угла наклонов этих линий равны $\partial\Delta\tau/\partial t$ и позволяют определить скорость распространения волны в каждый момент времени.

Для проверки корреляционного метода и оценки его возможности были проведены натурные эксперименты по измерению скорости распространения ралеевской волны. В качестве сейсмического источника использовался электродвигатель с дебалансом, установленный на платформе. Платформа перемещалась (рис. 1) с постоянной скоростью $v_0 = 1$ м/с из точки 1 в точку 2, останавливалась там, а затем с той же скоростью удалялась от точки 2. В точках 1 и 2 были установлены сейсмоприемники вертикальной компоненты скорости смещений грунта СВ-10, и, кроме того, в точке 2 был установлен сейсмоприемник горизонтальной компоненты СВ-10, ориентированный вдоль направления движения вибратора. Расстояние между сейсмоприемниками составляло 30 м, частота излучения была порядка 60 Гц.

Для контроля однододовости принимаемого излучения были измерены уровни сигналов на сейсмоприемниках (рис. 2). При приближении и удалении вибратора от приемника происходит монотонное увеличение и ослабление уровня принимаемого сейсмического сигнала. Резкое увеличение интенсивности при остановке вибратора обусловлено, по-видимому, уплотнением грунта и улучшением контакта.

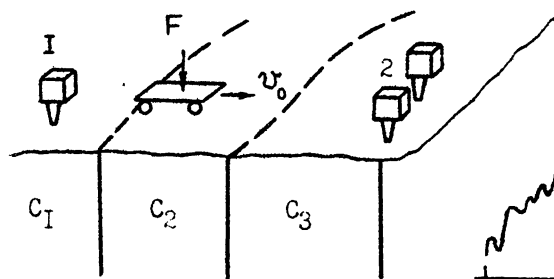


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению пространственного распределения скорости

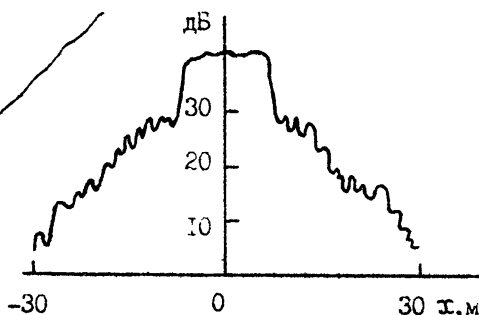


Рис. 2. Уровень сейсмического сигнала в точке 2

Измерялась также разность фаз между вертикальной и горизонтальной компонентами сигнала в точке 2. Она была порядка 90° во время движения вибратора от точки 1 к точке 2, а при удалении от точки 2 составляла величину $\sim 270^\circ$. Все это свидетельствует о том, что в нашем эксперименте преобладающую роль в принимаемом излучении играла одна мода рэлеевской волны.

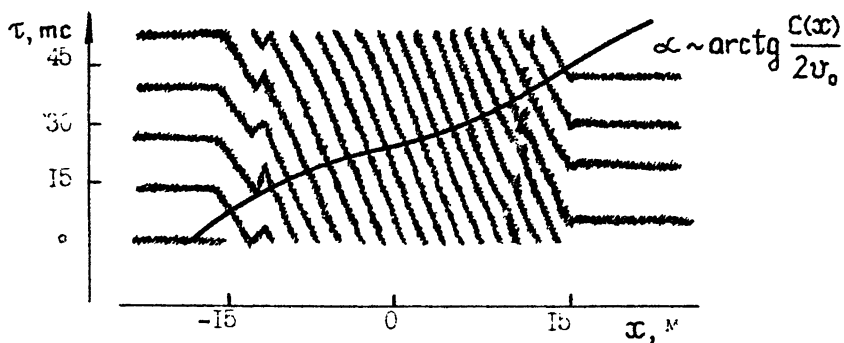


Рис. 3. Взаимная коррелограмма сейсмических сигналов в точках 1 и 2

Взаимная коррелограмма вида (4) была получена при обработке сигналов сейсмоприемников на цифровом корреляторе СТР-100, совмещенном с системой яркостной записи в координатах τ_k и t (рис.3). При движении вибратора между точками 1 и 2 происходит монотонное изменение разности времен $\Delta\tau(t)$ распространения сигналов, и средняя фазовая скорость распространения волны на всем участке $D = 30$ м определяется как $\omega_0 D / m\pi$, где m - число пересечений линий постоянной яркости коррелограммы с прямой $\tau_k = \text{const}$. Средняя скорость составляет величину порядка 200 м/с. Различные участки коррелограммы имеют разный наклон кривых $\Delta\tau(t)$; кроме этого наблюдаются скачки фазы, которые обусловлены, во-первых, контактными условиями (длина платформы ~ 50 см, или $\sim \lambda/4$) и, во-вторых, неоднородностями грунта. При повторении эксперимента изменения $\Delta\tau(t)$, вызванные неоднородностями, появляются в тех же точках траектории и могут быть отделены от контактных

Обсуждение эксперимента. Результаты применения корреляционного метода измерения скорости распространения поверхностной волны показывают, что использование движущегося сейсмического источника и корреляционная обработка сигналов эквивалентны расстановке цепочки приемников или излучателей с шагом $L = v_0 T$, где v_0 - скорость движения излучателя, T - время интегрирования при получении корреляционной функции. В нашем эксперименте $T = 0,5$ с, $v_0 = 1$ м/с и $L = 0,5$ м, что заменяет 60 приемников на расстоянии 30 м.

Оценим точность измерения скорости распространения. В импульсном методе скорость определяется по моменту вступления волны и в конечном счете точность измерений $\Delta c/c$ определяется логарифмом отношения амплитуд полезного сигнала и шума $/I_0/$:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\frac{\lambda}{2\pi L}}{\log_2 (1 + S^2/N^2)},$$

где λ - минимальная длина волны, соответствующая полосе частот, занимаемой импульсом, L - расстояние между сейсмоприемниками, S^2/N^2 - отношение мощностей полезного сигнала и шума во всей полосе. С увеличением мощности импульсного источника погрешность в измерении скорости не уменьшается, поскольку основной вклад в шум начинает вносить рассеяние поля и другие типы волн, создаваемые этим же источником. Увеличение расстояния L также не намного улучшает ситуацию, т.к. амплитуда полезного сигнала падает и, кроме того, за счет фильтрующих свойств среды, а также наличия дисперсии, форма импульсов меняется, что создает дополнительные трудности в определении момента вступления.

В корреляционном методе измеряются значения фазовой скорости для одной частоты сигнала, что дает возможность получить дополнительный выигрыш в отношении сигнал/шум путем фильтрации сигнала. Точность измерения скорости зависит от многих факторов: стабильности частоты вибратора, равномерности его движения, влияния волн других типов, интервала интегрирования, расстояния от вибратора до сейсмоприемников и т.д. Однако, как показали эксперименты, основной вклад в погрешности измерений дает изменение контакта вибратора с грунтом, что вызывает как амплитудные флуктуации сигналов, так и фазовые, ве-

личина которых зависит от отношения размеров зоны контакта к длине волны λ . Средняя величина фазовых флуктуаций составляла $\pi/4$. Из этого, можно сделать оценку точности измерений. Простой расчет показывает, что при пересечении вибратором неоднородности с размером ΔL и скоростью распространения волны $C_0 + \Delta C$ разность фаз сигналов сейсмоприемников изменится на величину

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \Delta L \Delta C}{\lambda C_0} \quad (5)$$

Полагая $\Delta\varphi = \pi/4$ и $\lambda = 3$ м, рассмотрим два случая.

1. Среда однородна по всей трассе, т.е. $\Delta L = 30$ м, и относительная погрешность измерения скорости равна 1%. 2. Среда неоднородна. Оценим минимальный размер неоднородности, которую можно обнаружить. Это зависит от отношения $\Delta C/C_0$. При $\Delta C/C_0 = 10\%$ минимальный размер составляет ~ 2 м.

Точность измерений можно существенно повысить за счет улучшения контакта и уменьшения его площади.

Отметим, что поскольку рассмотренная здесь методика основана на измерении доплеровских частот сигналов, она может быть применена и в задачах, где известна скорость распространения волны и требуется определить скорость и направление движения источника. Одной из таких задач является определение скорости подвижки дна при подводном землетрясении. Совпадение этой скорости со скоростью поверхностной волны в океане может явиться одной из причин образования цунами/11/. Возможность применения корреляционной методики для измерения скорости и направления подвижки дна океана рассматривалась автором в работе /12/.

3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОЙ И ГРУППОВОЙ СКОРОСТЕЙ ВОЛНЫ С ЛИНЕЙНОЙ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТОЙ

Метод измерения, описанный в предыдущем разделе, может быть использован и для определения зависимости фазовой скорости от частоты. Повторяя эксперимент на той же трассе, при одинаковых скоростях движения вибратора, но при различных частотах, можно измерить дисперсионную кривую. Однако такой подход является довольно трудоемким, требует большой стабильности скорости движения, точности установления

частоты вибратора, он также дает ограниченное число отсчетов. Представляет интерес получить непрерывную зависимость как фазовой, так и групповой скорости от частоты другими способами.

Рассмотрим процесс распространения сигнала с линейно изменяющейся частотой в диспергирующей среде. Если в начальной точке частота изменяется по закону $\omega = \omega_0 + \alpha t$, то на расстоянии r от вибратора частота будет изменяться как $\omega_0 + \alpha(t - \tau_0 - \Delta\tau_r(\omega))$, где $t > \tau_0 = r/C_{ог}$, $C_{ог}$ - групповая скорость волны на частоте ω_0 , $\Delta\tau_r(\omega)$ - групповая задержка сигнала, которая связана с групповой скоростью $C_r(\omega)$ соотношением

$$\frac{\Delta\tau_r(\omega)}{\tau_0} = \frac{C_{ог} - C_r(\omega)}{C_{ог}}, \quad \Delta\tau_r(\omega) \ll \tau_0. \quad (6)$$

Соотношение (6) означает, что на расстоянии r сигнал приобретает дополнительную частотную модуляцию

$$\alpha \Delta\tau_r(\omega) = - \frac{\Delta C_r(\omega)}{C_{ог}} \alpha \tau_0.$$

В принципе возможно непосредственное измерение этой модуляции, но для этого необходима аппаратура с высокой разрешающей способностью, а кроме того, при этом будет измеряться лишь групповая скорость волны.

Воспользуемся корреляционным методом измерения разности фаз сигналов. Фаза опорного сигнала, задержанного на величину $\tau_0 + \tau_k$, равна

$$\varphi_1(t) = \omega_0(t - \tau_0 - \tau_k) + \alpha(t - \tau_0 - \tau_k)^2/2. \quad (7)$$

Соответственно фаза волны равна

$$\varphi_2(t) = \omega_0(t - \tau_0) + \alpha(t - \tau_0)^2/2 - \int_0^{t - \tau_0} \alpha \Delta\tau_r(\omega) dt. \quad (8)$$

Воспользуемся известным соотношением между фазовой и групповой скоростями:

$$C_r = \frac{C_\varphi}{1 - \frac{\omega}{C_\varphi} \frac{dC_\varphi(\omega)}{d\omega}},$$

которое эквивалентно соотношению между фазовой и групповой задержками сигнала:

$$\Delta\tau_r(\omega) = \Delta\tau_\varphi(\omega) + \omega \frac{\partial \Delta\tau_\varphi(\omega)}{\partial \omega}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), интегрируя по частям и учитывая, что $\omega = \omega_0 + \alpha t$, получим

$$\varphi_2(t) = \omega_0(t - \tau_0) + \alpha(t - \tau_0)^2/2 - \omega' \Delta\tau_\varphi(\omega'), \quad \omega' = \omega - \alpha\tau_0.$$

Вычислим текущую корреляционную функцию сигналов (7) и (8). Время интегрирования T_n выберем таким, чтобы оно удовлетворяло двум условиям. Первое условие: $T_n \gg 2\pi/\omega_0$ необходимо для увеличения точности измерения фазы. Второе условие должно выполнять следующее требование: за время T_n изменение разности фаз $\varphi_2(t) - \varphi_1(t)$ должно быть

$$\Delta\varphi(t + T_n) - \Delta\varphi(t) = \alpha T_n \tau_k - \int_t^{t+T_n} \alpha \Delta\tau_r(\omega) dt \ll 2\pi.$$

Диапазон задержек $\Delta\tau_k$ следует выбирать порядка ширины корреляционного отклика $\frac{1}{\Delta F}$, где ΔF - полоса сигнала. Тогда автоматически выполнится условие $\Delta\tau_r(\omega) < \Delta\tau_k$, что позволит измерить всю дисперсионную кривую. Окончательно условие для T_n сформулируем следующим образом:

$$\frac{2\pi}{\omega_0} \ll T_n \ll T, \quad (10)$$

где T - длительность сигнала. Если ω_0 и ΔF одного порядка, то оба неравенства выполняются с одинаковой силой при

$$T_n = T/\sqrt{M}, \quad M = \Delta F \cdot T. \quad (11)$$

Запишем теперь выражение для взаимной корреляционной функции сейсмического и опорного сигналов:

$$R(\tau_k, t) = A(\omega') \cos \left[\omega' \tau_k - \frac{\alpha \tau_k^2}{2} - \varphi(\omega') \right],$$

где $\omega' = \omega_0 + \alpha(t - \tau_0)$, $\varphi(\omega') = \Delta\tau(\omega')\omega'$.

В отсутствие дисперсии ($\varphi(\omega) \equiv 0$) линии постоянной фазы - это семейство гипербол, описываемых при $\alpha \tau_k^2/2 \ll 2\pi$ уравнениями

$$\tau = \frac{\pm n\pi}{\omega_0 + \alpha(t - \tau_0)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

Наличие дисперсии приводит к отклонению этих линий на величину фазовой задержки $\Delta\tau_{\phi}(\omega)$, причем наиболее удобно измерять отклонение центральной линии около τ_0 , где τ_0 - максимальная фазовая задержка сигнала на частоте $\omega_0 + \alpha T$. Отметим, что предложенный здесь метод измерения волнового параметра аналогичен интерференционному методу в спектроскопии, который применил Д.С. Рождественский для исследования линий поглощения в парах натрия /13/.

Оценим точность измерений. Минимальное отклонение τ_{\min} , которое можно измерить, равно $2\pi/\omega\sqrt{S^2/N^2}$, где S/N - отношение сигнала к шуму после интегрирования. Поэтому относительная точность измерений фазовой скорости равна

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{\frac{\lambda}{r}}{\sqrt{S^2/N^2}} \quad (13)$$

Число отсчетов в соответствии с (II) равно \sqrt{M} . Отметим, что оценка точности измерения скорости совпадает с оценкой, приведенной в работе /14/, для метода, основанного на измерениях фазового спектра.

Была проведена экспериментальная проверка корреляционного метода при измерениях фазовой скорости поверхностной сейсмической волны. Гармонический вибратор плавно перестраивался в диапазоне 70 ± 25 Гц за время 20 с ($M = 900$). На расстоянии 30 м от вибратора располагался сейсмоприемник. Зависимость уровней опорного и принимаемого сигнала от частоты приведена на рис.4, взаимная корреляционная функция при времени усреднения 20 с приведена на рис.5. Из рассмотрения этих графиков видно, что в нашем эксперименте основной вклад в принимаемый сигнал вносил один тип волны, распространяющийся со средней групповой скоростью ~ 280 м/с.

Волны других типов вызывают квазипериодические изменения интенсивности сигнала, а также создают дополнительные максимумы взаимокорреляционной кривой. Вклад этих волн в суммарную энергию составляет не более 10%. Отметим, что на рис. 5 наблюдается довольно сильный максимум при $\tau_0 = 150$ мс ($c_r \approx 200$ м/с), но, как будет видно далее, это тот же тип волны, что и на задержке 105 мс.

Текущая взаимная коррелограмма сейсмического и опорного сигнала при $T_{\mu} = 0,5$ с представлена на рис. 6. Линии постоянной фазы в области частот 70 ± 40 Гц почти не отличаются от гипербол, симметрично расходящихся относительно линии $\tau_0 = 105$ мс, а на частотах 40 ± 25 Гц

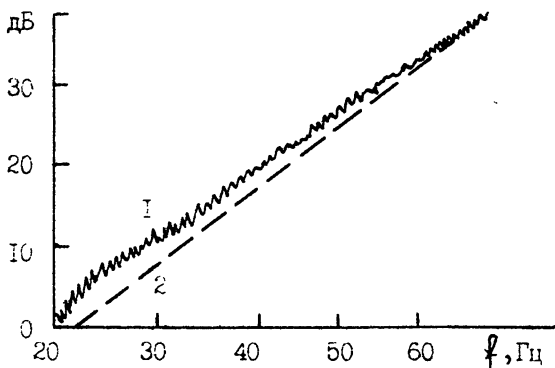


Рис. 4. Уровни сейсмического (2) и опорного (1) сигналов

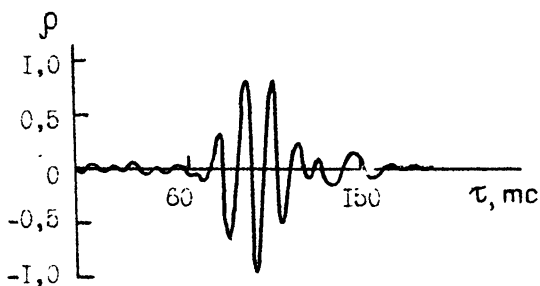


Рис. 5. Взаимная корреляционная функция сейсмического и опорного сигналов ($T_H = 20c$)

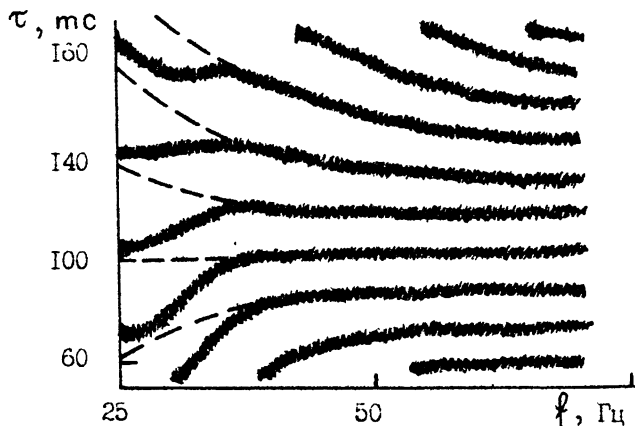


Рис. 6. Текущая взаимная коррелограмма сейсмического и опорного сигналов

происходит изменение $\Delta\tau_{\phi}(t)$, причем $C_{\phi}(\omega)$ с ростом частоты уменьшается немонотонно. Зависимость фазовой скорости от частоты, полученная в эксперименте, представлена на рис.7. Дисперсионные кривые такого вида характерны для поверхностных рэлеевских волн, распространяющихся в слое с пониженной скоростью, лежащей на однородном полупространстве, причем точки перегиба $C_{\phi}(\omega)$ соответствуют фазе Эйри, в которой групповая скорость минимальна, а также минимально и затухание. Теперь ясно, что корреляционный пик на скорости 200 м/с вызван дугом колебаний того же типа волны. Заметим, что в уровне сигнала на этих частотах наблюдается подъем (см.рис.4), относительно уровня опорного сигнала.

Используя соотношение между групповой и фазовой скоростью (9) можно получить зависимость групповой скорости от частоты. Однако можно обойтись и без вычислений, если учесть, что групповая скорость — это скорость распространения огибающей дуга колебаний в полосе частот $\omega \pm \Delta\omega/2$. Это означает, что достаточно провести измерения текущей взаимокорреляционной функции сейсмического и опорного сигналов с временем усреднения $T = \Delta\omega/c$ и определить задержку максимума огибающей корреляционного отклика на всех центральных частотах. Поскольку для определения положения максимума огибающей требуется большой динамический диапазон, текущие коррелограммы записываются не на экране запоминающего осциллографа, а на двухкоординатном самописце. Пути колебаний в полосах ± 5 Гц приведены на рис.8. Здесь же построена кривая зависимости групповой скорости от частоты.

4. ВЛИЯНИЕ И УЧЕТ МНОГОМОДОВОСТИ

Наличие нескольких типов волн, распространяющихся с различными скоростями, является серьезным препятствием при любых фазовых измерениях, тем более при измерениях дисперсионных зависимостей. Даже при наличии только двух типов волн с отношением амплитуд K ошибка измерения дисперсионной кривой составит величину порядка $1/K$ для сильной моды, а для слабой моды измерения дисперсии вообще становятся невозможными.

Рассмотрим сначала влияние многомодовости на результат измерений пространственной зависимости фазовой скорости методом, описанным в п.2. Запись взаимной корреляционной функции сейсмических сигналов в координатах τ, t будет представлять собой пространственную

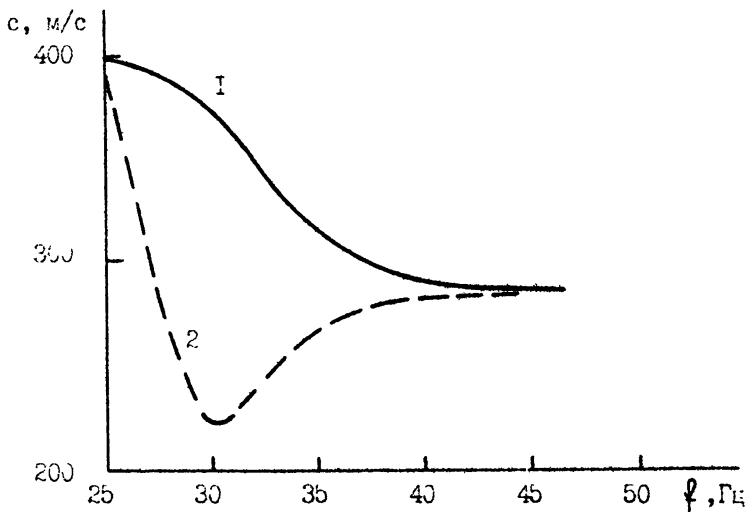


Рис. 7. Зависимость фазовой (1) и групповой (2) скорости от частоты

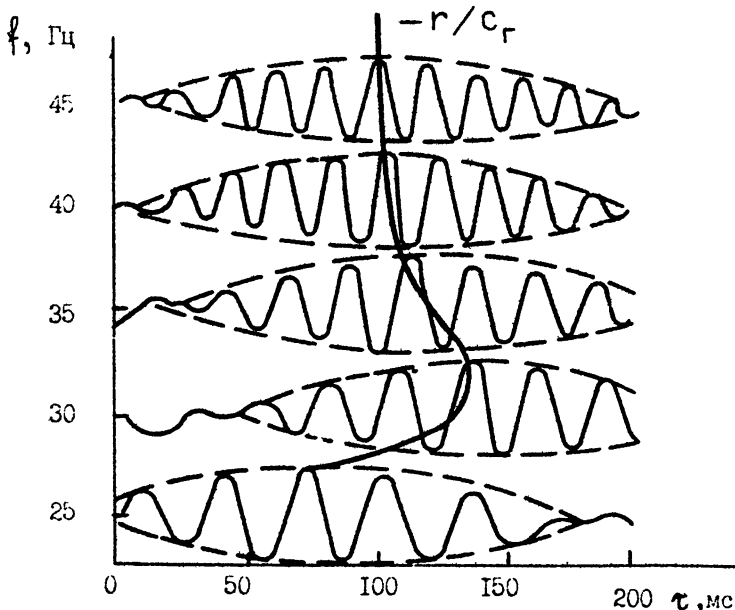


Рис. 8. К определению групповой скорости. (Пути корреляционной функции)

структуру вида

$$R(\tau, t) = \sum_i A_i(t) \cos [\omega_0(\tau - \Delta\tau_i(t))], \quad (14)$$

где i - номер типа волны, $A_i(t)$ - ее амплитуда, $\Delta\tau_i(t)$ - разность времен прихода в точки приема. Напомним, что углы наклона линий постоянной фазы определяют пространственную зависимость скорости распространения волны $C(x = v_0 t)$, (v_0 - скорость движения вибратора), причем средний угол наклона линий равен

$$\bar{\alpha} = \arctg \frac{v_0}{C(x)}$$

Очевидно, волны с разными фазовыми скоростями дают пространственные структуры с различными наклонами, причем пространственная частота этих структур вдоль оси τ одинакова, а число пересечений оси t равно $2D/\lambda_i$, где D - длина траектории движения вибратора, $\lambda_i = 2\pi C_i/\omega_0$ - длина волны i -й моды. Разделение таких структур по углам наклона легко производится методами оптической обработки и голографии, осуществляющими спектральный анализ сигналов по пространственным частотам /15/. При этом получаются средние значения скоростей с разрешающей способностью $\Delta C/\bar{C} = \lambda/D$, но информация об изменениях $C(x)$ теряется. Для измерения $C_i(x)$ можно применить оптический корреляционный анализатор, основанный на муаровом эффекте /16/.

Зная средние значения скоростей можно подобрать периодическую структуру для $C_i(x)$ и совместить ее с пространственной структурой (14) с небольшим наклоном. Тогда в плоскости τ, t образуются муаровые полосы, перпендикулярные линиям равной фазы $\frac{\partial \tau_i}{\partial t}$, т.е. наклон муаровых полос будет пропорционален $C_i(x)$.

Обсудим теперь влияние многомодовости на измерение дисперсионных кривых. Каждая мода будет создавать пространственные структуры вида

$$A_i(\omega) \cos \left[\omega \tau_k - \frac{\alpha \tau_k^2}{2} - \varphi_i(\omega) \right] \quad (15)$$

сдвинутые по оси τ на величины $\Delta\tau_{nm}$ разности времен прихода соседних мод. Пространственное разделение таких структур по параметру $\Delta\tau_{nk}$ с сохранением информации о фазе также возможно при помощи оп-

тической двумерной обработки /17/, причем разрешающая способность по $\Delta\tau_{nm}$ определяется диапазоном задержки $\Delta\tau_k$. Максимальная разрешающая способность осуществляется при $\Delta\tau_k = T$, тогда $\Delta\tau_{nm \min} = 1/\Delta F$. Запись пространственной структуры с таким диапазоном задержек непосредственной корреляционной обработке сейсмического сигнала невозможна, т.к. не будет выполняться условие (10). Удовлетворить этому условию можно путем однополосной фазовой модуляции исследуемыми сигналами с полосой ΔF , несущей частоты $f_0 \gg \Delta F$. Если $\Delta\tau_{nm} > 1/\Delta F$, то возможен более простой способ приближенной оценки дисперсионных зависимостей. При измерении взаимной корреляционной функции время интегрирования T_n выбирают, исходя из условия $T_n \geq 1/\Delta\tau_{nm}$ или $T_n \geq T/\Delta F \Delta\tau_{\min}$. Тогда вклад соседних мод в пространственную структуру (15) усредняется, а в выделенной структуре измеряется сглаженная дисперсионная кривая в $n = \Delta F \Delta\tau_{nm}$ точках (см. рис.8)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ разработанных корреляционно-фазовых методов и результаты экспериментов показали возможность оперативного измерения пространственных и частотных зависимостей фазовой и групповой скоростей сейсмических волн. Применение при этом гармонического сигнала, а также сигнала с медленно-перестраиваемой частотой позволяет осуществлять частотную фильтрацию и тем самым существенно повышать отношение сигнал/шум по сравнению с импульсными методами. Принципиальная возможность разделения типов волн, заложенная в корреляционно-фазовых методах, позволяет проводить исследования в ближней зоне вибратора и тем самым исследовать мелкомасштабные (сравнимые с длиной волны) изменения неоднородностей и отражающих границ.

Л и т е р а т у р а

1. Зверев В.А. Модуляционный метод измерения дисперсии ультразвука : Диссертация на соиск. степ. канд. физ.-мат.наук. - Горький, 1953 - 174 с.
2. Горская Н.В., Иванов А.Н., Курин В.В., Морозова Н.И., Салин Б.Н. Фазовые соотношения при распространении тригармонической волны в маломодовых акустических волноводах. - Акуст. ж., 1985, т. XXXI, вып.6, с.796-799.
3. Savage J.C. Radiation from a realistic model of faulting. - Bulletin of the Seismological Society of America, 1966, v.56, p.577 - 592.
4. Press F. Determination of cristal structure from phase velocity of Rayleigh waves. - Bulletin of the Geological Society of America, 1956, v.67, p.1647 - 1658.
5. Knopoff L., Berry M.J., Schwab F.A. Tripertite phase velocity observations in laterally heterogeneous regions. - J.Geophys.Res., 1967, v.72, p.2595 - 2601.
6. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. - М.: Наука , 1966, 404 с.
7. Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. - М. : Наука, 1981, 336 с.
8. Сейсморазведка. /Под редакцией И.И.Гурвича, В.П.Номоканова. - М.: Недра, 1981, 464 с.
9. Зверев В.А., Орлов Е.Ф., Семенов В.В., Спиридонова И.К. Определение формы спектральной линии радиочастотного генерала. - Изв. вузов. - Радиофизика, 1969. т. XII, № 8.
10. Pakiser L.S., Steinhart J.S. Explosion seismology in the western hemisphere. - Bull.Seism.Soc.Am., 1971, v.61, p.1119 - 1152.
11. Новикова Л.Е., Островский Л.А. О возбуждении волн цунами бегущей подвижной океанического дна. - В кн.: Методы расчета возникновения и распространения цунами. - М.: Наука, 1978, с.88-99.
12. Семенов В.В. О возможности определения скорости движения разлома при землетрясении. - В сб.: Сопещание по цунами. - Горький. : ИФФ АН СССР, 1984, с.143-145.

13. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: ГИТТЛ, 1957, 759 с.
14. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. т.П. - М.: Мир, 1983, 676 с.
15. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Наука, 1971, 616 с.
16. А.с. 796872 (СССР). Оптический коррелятор (В.В.Семенов. - Заявл. 26.02.79 № 2740615). Оpubл. Б.И., 1981, № 2.
17. Экспериментальная радиооптика. /Под редакцией В.А.Зверева и Н.С. Степанова. - М., Наука, 1979, 255 с.

Дата поступления статьи
22 мая 1986г.

Валентин Викторович Семёнов

КОРРЕЛЯЦИОННО-ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Подписано в печать 26.06.86г. МЦ 00922. Формат 60x84/16
Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 1,25 п.л. Тираж 120
Заказ 4443. Бесплатно

Отпечатано на ротапринте Н И Р Ф И