

Частотно-импульсный режим возбуждения сейсмических волн группой импульсных невзрывных источников

В.А. Детков, Г.Я. Шайдунов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

В практике сейсморазведочных работ, в целях увеличения отношения сигнал/шум, общепринята методика группирования n -источников излучения, как невзрывных, так и взрывных, путем синхронизации моментов их излучения. При этом отношение сигнал/шум на входе сейсмоприемников растет пропорционально числу источников n .

Экспериментальными работами [1] было показано, что точность синхронизации по времени включения импульсных источников должна быть не хуже 100 мкс. Рассинхронизация существенно снижает эффективность работы группы. Остается неясным вопрос о влиянии разбросов начальных моментов формирования сейсмической волны за счет неидентичности параметров подстилающего источник грунта.

Не вдаваясь в эту проблему, считая, что источники идеально согласованы по началу времени возбуждения рассмотрим возможности управления частотой излучения сейсмической волны путем последовательного возбуждения группы источников с некоторым периодом повторения T_1 , согласованным с желаемым спектром излучения.

Заметим, что используемое ниже понятие энергетического спектра относится к квадрату модуля амплитудно-частотной характеристики возбуждаемых сейсмических волн под действием единичного импульса. Энергетический спектр синхронных помех (СП) формируется из частных типов волн, как их совокупность, с энергетическим суммарным спектром:

$$F_n(\omega) = \sum_{i=1}^N F_{ni}(\omega_i) \quad (1)$$

где $F_{ni}(\omega_i)$ – спектральная плотность мощности отдельных спектральных составляющих СП. Предельное отношение сигнал/(СП+шум) по мощности при оптимальной обработке сигналов определяется как [2]:

$$q_{opt} = \frac{T}{\pi(1+v)} \sum_{i=1}^N \frac{S_i^2(j\omega) d\omega}{P_i F_{ni}(j\omega_i)} \quad (2)$$

Здесь $P_i = \frac{I(j\omega_i)}{I(j\omega)}$ – относительный вес в спектре

частот возбуждаемых гармоник СП ($i=1, 2, 3 \dots n$); $S_i(j\omega)$ – характеристика полезного сигнала; v – отношение шум/СП; T – время существования сигнала. Максимальное значение (2) достигается при $i=1$ и $S_i^2(j\omega_i) = F_{ni}(j\omega_i)$, что означает возбуждение сейсмических волн на желаемой частоте полезного сигнала. В качестве возбудителя может быть использован либо вибрационный источник, либо импульсный – с частотой повторения импульсов, соответствующей частоте возбуждения полезного сигнала.

Как видно из (2), при малом шуме ($v \ll 1$) величина q_{opt} определяется лишь отношением полезный сигнал/СП и не зависит от мощности источника возбуждения сейсмических волн.

На рис. 1 изображены временные функции одиночного и периодически повторяемого импульсного сигнала, а также их спектральные характеристики.

В полосе частот $\left[0, \frac{2\pi}{\tau}\right]$ сосредоточено до 90% энергии сигнала.

Режим повторения импульсов с периодом T_1

формирует гребенчатую структуру частотной характеристики с полосой частот $\omega = \frac{2\pi}{T_1}$, сосредоточенной по энергетике вокруг желаемой частоты возбуждения ω_c и ее гармоник.

Согласно [3] спектр одиночного косинусоидального импульса длительностью τ описывается функцией:

$$S_1(\omega) = \frac{2}{\pi} I_0 \tau \frac{\cos \omega \tau / 2}{1 - \left(\frac{\omega \tau}{\pi}\right)^2} \quad (3)$$

$$P_c = n \int_{-\Delta\omega_c}^{\Delta\omega_c} S_1^2(\omega) d\omega \approx 2n S_1^2(\omega_c) \Delta\omega_c \quad (4)$$

где $2\Delta\omega_c = \frac{4\pi}{T_1}$ – ширина спектра зондирующего сигнала.

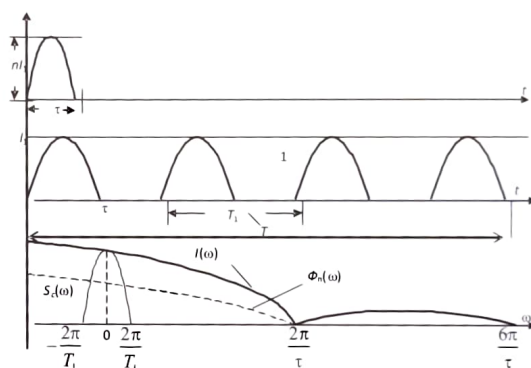


Рис.1. Временная структура и спектры одиночного сигнала и пачки из пяти импульсов

Спектральная плотность пачки из n источников растет также, как и энергия группы источников, т.е. прямо пропорционально их числу. Мощность синхронных помех для этого же случая:

$$P_{n1} = n \int_{-\Delta\omega_c}^{\Delta\omega_c} F_n(\omega) d\omega = 2n F_n(\omega_c) \Delta\omega_c \quad (5)$$

где $F_n(\omega_c)$ – спектральная плотность мощности СП на частоте сигнала.

$$\text{Отношение } \frac{C}{СП} : q_1 = \frac{P_{c1}}{P_{n1}} = \frac{S_1(\omega_c)}{F_n(\omega_c)} \quad (6)$$

В случае одновременного излучения n источниками:

$$P_{c2} \approx 2n S_1^2(\omega_c) \Delta\omega_c \quad (7)$$

$$P_{n2} = n \int_{\omega_1}^{\omega_2} F_n(\omega) d\omega \approx n F_n(\omega) (\omega_2 - \omega_1)$$

Отношение $C/СП$ для этого случая:

$$q_2 = \frac{2S_1^2(\omega_c) \Delta\omega_c}{F_n(\omega) (\omega_2 - \omega_1)} \quad (8)$$

Выигрыш метода последовательного возбужде-

ТЕОРИЯ
ИМПУЛЬСНАЯ НЕВЗРЫВНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

ным по отношению к одновременному

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{I_1(\omega_1 - \omega_2)}{2I_2(\omega_1 - \omega_2)} \quad (9)$$

В приближении равномерного распределения энергетического спектра СП в полосе частот возбуждения $F(\omega) \approx F_0(\omega)$, из (9) получим

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\Delta\omega} \quad (10)$$

С учетом того, что $\omega_1 < \omega_2$, $\omega_2 \approx \frac{2\pi}{T} + \Delta\omega$, из (10) будем иметь:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{1}{2} \frac{T}{\tau} \quad (11)$$

Поскольку $T = 2\pi\tau$, то

$$\frac{q_1}{q_2} = n \quad (12)$$

Таким образом, последовательное возбуждение источников, по сравнению с одновременным, дает энергетический выигрыш в отношении сигнал/СП по мощности приблизительно в n раз, т.е. пропорционально числу используемых источников.

Физически это означает, что возбуждение геологического разреза на ожидаемой частоте полезного сигнала позволяет не излучать весь спектр СП в полосе $(\omega_2 - \omega_1)$, а лишь в полосе сигнала $2\Delta\omega$, и тем самым более рационально использовать энергию источника.

В этом смысле вторичная фильтрация сигналов в приемнике не адекватна получаемому выигрышу.

Действительно, настраивая приемник на частоту сигнала ω , мы одновременно уменьшаем мощность СП в полосе приемника и в этом смысле отношение С/СП на выходе приемника получается одинаковым для обоих методов, но выигрыш в энергетических затратах излучателя на создание этого результата при последовательном возбуждении имеется и определяется (12).

Так, при $n = 5$, до 80% энергии излучателей уходит на создание синхронных помех, формирующих на входе приемника мощную помеху, требующую для обработки адекватного динамического диапазона по амплитуде. В этом случае, при наличии нелинейностей в коэффициенте передачи усилительного тракта до аналого-цифрового преобразователя, возможны эффекты подавления слабого полезного сигнала более сильной помехой. К тому же, мощный фон СП затрудняет визуальную интерпретацию сейсмограмм на этапе их получения в поле.

Целесообразность использования режима последовательного возбуждения источников определяется также ограничениями энергетического потенциала источника, в частности при работе от аккумуляторов, а также необходимостью увеличения производительности работ. В этом случае нужно минимизировать число повторных ударов в целях накопления полезных сигналов и увеличения их по отношению к шумам.

В качестве модели формирования продольной волны полезного сейсмического сигнала используем передаточную функцию колебательной системы. Эквивалентом этой модели может служить колебательный контур с амплитудно-частотной характеристикой вида:

$$K(f) = \frac{\rho Q}{\sqrt{1 + 4Q^2(f - f_{res})^2}} \quad (13)$$

где $\rho = \frac{L}{C}$ – волновое сопротивление контура;

$Q = \frac{f_{res}}{\Delta f}$ – добротность; $f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ – резонанс-

ная частота.

Электрические параметры контура $L=1,58 \mu\text{H}$, $C=10^{-8} \text{ Ф}$, $R=100 \text{ Ом}$, $Q = \frac{\rho}{R}$. При этом $f_{res}=100 \text{ Гц}$, $Q=2$. Полоса пропускания по уровню 0,7 $\Delta f=24 \text{ Гц}$. Частотная характеристика контура приведена на рис. 2

На рис. 3 изображена временная форма одиночного импульса (рис. 3) синусоидального сигнала длительностью 5 мс (а), его спектра (б), реакции модели колебательной системы (в) и выходного спектра сигнала, прошедшего через модель (г).

На рис. 4 изображены аналогичные характеристики для пачки из пяти сигналов той же длительности с периодом повторения $T_p = 25 \text{ мс}$ и амплитудой в 5 раз меньшей.

Как видно из рисунка, спектр подобного сигнала сосредоточен в трех частотных окнах: 0-10 Гц, 30-50 Гц, 70-90 Гц, причем третье окно соответствует второй гармонике частоты повторения.

Выходной сигнал модели рис. 4 (в) имеет затухающую колебательную форму, т.е. вполне описывает наблюдаемые сигналы на выходе сейсмодатчиков, а его спектр рис. 4 (г) сосредоточен около частоты повторения группы импульсов – 40 Гц.

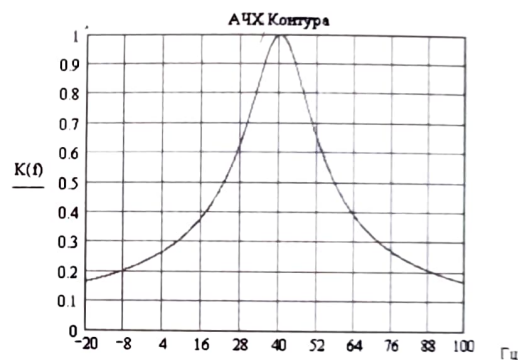


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика модели формирования полезного сигнала

На рис. 5 изображены соответствующие эпюры для пачки из 5 импульсов, того же периода повторения – 25 мс, но длительностью $\tau = 12,5 \text{ мс}$, при сохранении энергии в импульсе. Из эпюр видно, что по сравнению с рис. 4 в этом режиме уменьшилась в 2 раза амплитуда спектральной линии второй гармоники. Снижение периода повторения импульсов до $\tau=10 \text{ мс}$ смещает центральную частоту спектра излучаемого сигнала соответственно с частотой повторения 100 Гц, а выходной спектр сигнала становится более равномерным в полосе 0-120 Гц. Это отражает факт избирательного действия модели, настроенной на частоту 40 Гц относительно излучаемой пачки импульсов.

Сопоставления этих рисунков позволяет сделать вывод о том, что спектральная плотность мощности входного сигнала на частоте настройки модели 40 Гц сохранилась в обоих случаях. Однако амплитуда выходного сигнала в пачке уменьшилась в 5 раз по сравнению с 5-кратным одиночным импульсом, а спектральная плотность мощности на частоте 40 Гц практически не изменилась.

Таким образом, ожидаемая на сейсмограмме амплитуда сигнала, соответствующая описанному вычислительному эксперименту, по отношению к шуму снижается и только после обработки сигнала цифровым фильтром, настроенным на частоту повторения импульсов в пачке, отношение сигнал/шум восстанавливается на выходе

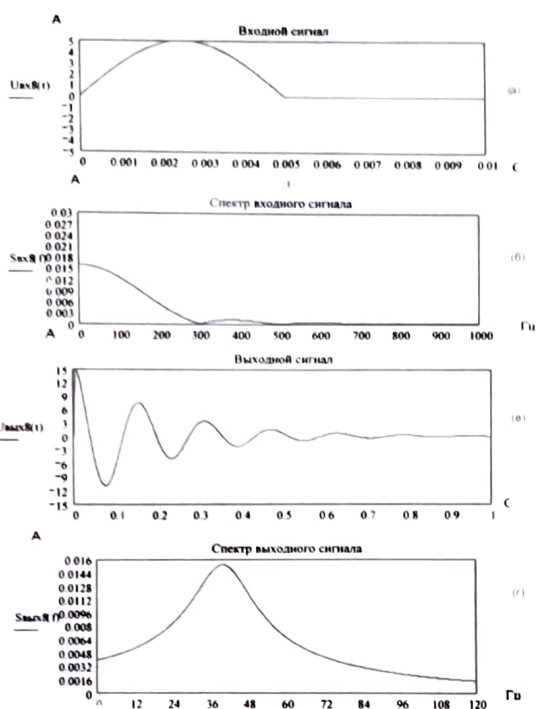


Рис. 3. Временная форма одиночного импульса синусоидального сигнала длительностью 5 мс (а), его спектра (б), реакции модели колебательной системы (в) и выходного спектра сигнала, прошедшего через модель (г)

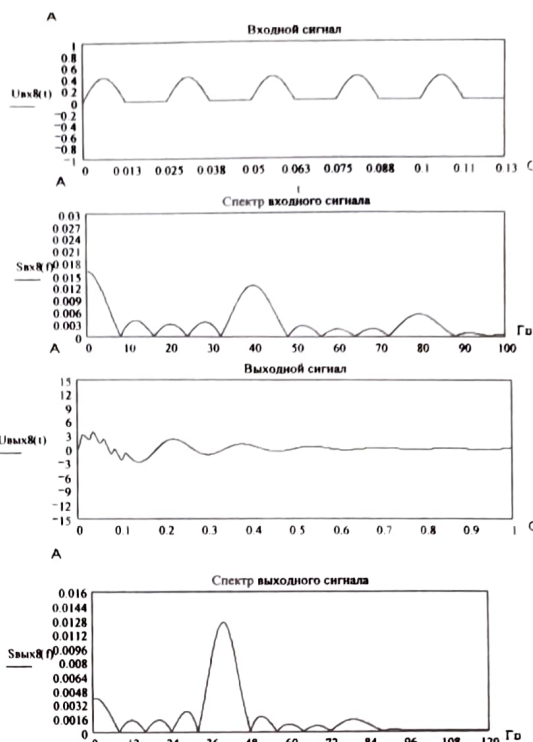


Рис. 5. Соответствующие эпюры для пачки из 5 импульсов, того же периода повторения – 25 мс, но длительностью 12,5 мс при сохранении энергии в импульсе

широкополосных шумов. Для последовательного режима возбуждения тот же результат оператор может видеть лишь на выходе цифрового фильтра. Поскольку результирующая спектральная плотность мощности на выходе модели рис. 3 одинаковы, а обработка фильтром, согласованным с полезным сигналом, снижает уровень входных шумов в равной степени, то в итоге после вторичной обработки оба метода по критерию отношения сигнал/шум дают одинаковый результат.

В другом крайнем случае, когда синхронные помехи существенно превышают полезный сигнал, последний будет более рельефно виден на фоне СП, поскольку излучаемый сигнал плохо возбуждает СП при возбуждении георазреза пачкой импульсов. Здесь должно проявляться преимущество метода последовательного возбуждения.

В сентябре 2007 года в Богучанском районе Красноярского края проведены полевые предварительные эксперименты, сделанные на основе теоретических выводов, изложенных в статье. В данный момент экспериментальные данные находятся на этапе обработки и анализа, по результатам которых будет определено соответствие теоретических и практических оценок.

Управление временным запаздыванием излучения группы невзрывных источников позволяет решить также ряд дополнительных проблем сейсморазведки [4], таких как изменение направленности излучения, ослабление влияния волн-помех, управление кинематикой отраженных волн и др.

Литература

1. Смирнов В.П. Технические средства и содержание проверки источников ряда «Енисей» в цикле накопления одиночных и групповых воздействий. Приборы и системы разведочной геофизики, № 2. Саратов, 2005. С. 45-48.
2. Шайдулов Г.Я. Импульсные электромагнитные системы поиска. Красноярск: КГТУ, 1999. 320 с.
3. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962.
4. В.Я. Бендерский, Л.Д. Райхер, И.И. Хараз. Метод управления фронтами волн в сейсморазведке. М.: Недра, 10 973. 200 с.

цифрового согласованного фильтра. Откуда можно сделать вывод о достоинствах и недостатках рассматриваемых методов возбуждения.

В случае высокого уровня некоррелированных шумов по сравнению с синхронными помехами одновременное возбуждение излучателей позволяет оператору сейсмостанции лучше различить принимаемый полезный сигнал над уровнем

синхронные помехи, формируемые первым слоем, так и полезные сигналы первого отражения.

Эквивалентная системная модель задачи представлена на рис. 4.

Передаточные функции модели рис. 3 запишем как:

$$\Phi_{12} \Phi_{27} = \Phi_{17} e^{-p\tau_1}; \tau_1 = \frac{2r_1}{V_1}, \quad (12)$$

$$\Phi_{13} \Phi_{37} = \Phi_{137} e^{-p\tau_2}; \tau_2 = 2 \left(\frac{r_1}{V_1} + \frac{r_3 - r_1}{V_2} \right), \quad (13)$$

$$\Phi_{14} \Phi_{47} = \Phi_{147} e^{-p\tau_4}; \tau_4 = \frac{r_1}{V_1} + \frac{r_3 - r_1}{V_2} + \frac{r_{34}}{V_3}. \quad (14)$$

Реверберационная помеха двукратного отражения в первом слое:

$$\Phi_{12} \Phi_{27} \Phi_{78} \Phi_{89} = \Phi e^{-p\tau_{219}}; \tau_{219} = \frac{4r_1}{V_1}. \quad (15)$$

ПФ реверберационной помехи трехкратного отражения первого слоя можно записать в виде:

$$\Phi_{3p19} = \Phi_{12}^6 e^{-p\tau_{319}}; \tau_{319} = \frac{6r_1}{V_1}. \quad (16)$$

ПФ сигнала преломленной волны в первом слое запишем приближенно в виде:

$$\Phi_{119} = \Phi_{12}^2 \Phi_{22} e^{-p\tau_{11}}; \tau_{11} \approx \frac{2r_1}{V_1} + \frac{x_2}{V_1}, \quad (17)$$

где Φ_{22} , V_{11} - соответственно ПФ и скорость распределения преломленной волны. Остальные

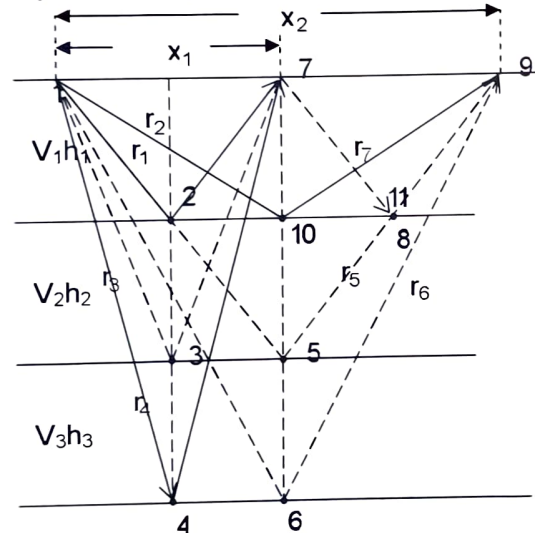


Рис. 3. Формирование сигнала в трехслойной модели. 1-10 - точки отражения и приема; 11 - преломленная волна в первом слое; V_i , h_i - соответственно скорости распространения сигналов и мощность слоев; r_i - длина пути сигнала в слое; x_1 , x_2 - расстояние между источником и сейсмоприемниками

ПФ определяются аналогичным образом.

Если интенсивность преломленной волны невелика по сравнению с реверберационной (РБ), то РБ помеху можно восстановить через соотношение (16) с оценкой кратности ее запаздывания по отношению к запаздыванию сигнала от полезного слоя.

По рис. 3 можно оценить кратность запаздывания РБ помехи.

Условие наложения на полезный сигнал i -го слоя РБ помехи:

$$\tau_{PB} = \tau_i \quad (18)$$

Где, например, для сигнала второго слоя:

$$\tau_i = \tau_5 = \frac{2r_5}{V_2} \quad (19)$$

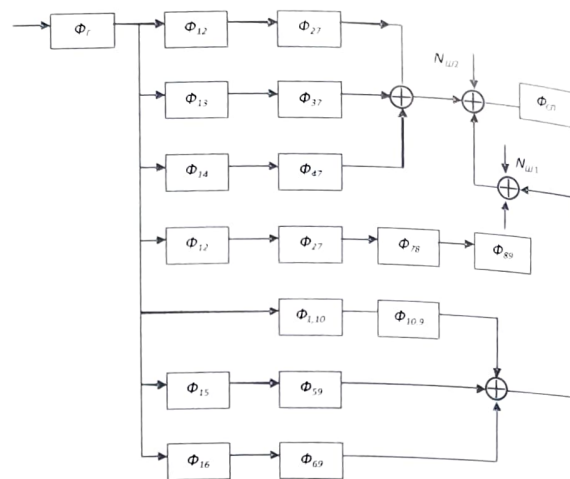


Рис. 4. Системная модель для трехслойной модели.

Для третьего слоя

$$\tau_i = \tau_6 = \frac{2r_6}{V_3}, \quad (20)$$

где V_2 и V_3 - эффективные скорости распространения сигналов до точек отражения 5 и 6 с учетом скоростей распространения в первом и втором слоях.

Запаздывание РБ помехи:

$$\tau_{Di} = \frac{2kr_1}{V_1}. \quad (21)$$

Здесь k - кратность отражения, которая может быть определена через соотношение: $\frac{\tau_{PB}}{\tau_i}$.

Так для второго слоя:

$$\frac{\tau_{Di}}{\tau_5} = \frac{2kr_1 V_2}{V_1 \cdot 2r_5}. \quad (22)$$

Поскольку величины запаздывания сигналов

$\tau_1 = \frac{2r_1}{V_1}$ и $\tau_5 = \frac{2r_5}{V_2}$ известны по результатам приема.

то величина кратности определяется из (22) прямым вычислением. Наличие РБ помехи определяется критерием $k = 1, 3, 5, \dots$, т.е. нечетными числами натурального ряда.

Если получаемое при приеме сигнала отношение (22) соответствует этому критерию, то это означает присутствие в полезном сигнале РБ помехи.

В этом случае с помощью соотношений типа (15) и (16) синтезируется сигнал РБ помехи по данным ПФ первого слоя Φ_{12} , полученной из сигнала ближайшего к излучению сейсмоприемника в точке 7. Затем восстановленная таким образом РБ помеха вычитается из необходимого полезного сигнала, отраженного от интересующего слоя.

Выводы

На основе линейной модели передачи сейсмического сигнала через двухслойный и трехслойный разрез получен алгоритм оценки отношения сигнал/шум, достаточной для определения минимально необходимого числа ударов, заключающийся в спектральном преобразовании сигналов первого и последнего вступления, получаемых на выходе ближайшего к излучателю сейсмоприемника и путем нормировки последнего вступления к первому оценивают уровень полезного сигнала, а уровень шума определяется через их дисперсию в паузе между ударами.

Показаны возможности подавления кратных помех путем синтеза их временной формы, оценки числа кратности отражений и вычитания синтезированной помехи из комбинации с полезным сигналом.

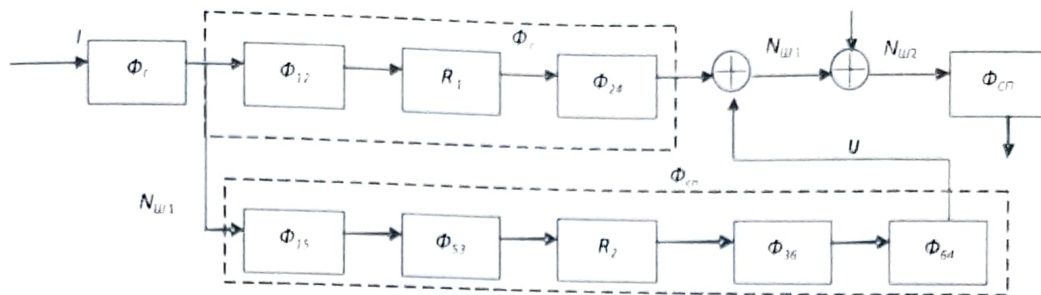


Рис. 2 Системная линейная модель формирования сигнала в двухслойной модели сейсмического разреза

В случае СП/Ш

$$q = \left(\frac{\Phi_c}{\Phi_n} \right)^2 \quad (5)$$

Т.е., в этом случае наблюдаемое отношение на сейсмоприемнике не зависит от числа повторений ударов и определяется лишь отношением ПФ сигнала и синхронных помех.

Таким образом, при желании минимизировать число ударов, необходимо иметь информацию об отношении сигнал/шум, предварительно исключив каким-либо методическим приемом синхронную помеху.

Используя рис. 2, определим ПФ, входящие в уравнения (1) и (3).

Для начала рассмотрим двухслойную модель сейсморазреза рис. 1.

При действии на сейсморазрез импульсного источника сейсмический сигнал, пройдя расстояние r_1 , отражается от первой границы и поступает на сейсмоприемник в точке 4. Будем считать, что сейсмоприемник находится вблизи источника, так что путь $2r_1$ – это однократное отражение. От границы второго слоя сигнал отразится в точке 3, пройдя суммарное расстояние $2r_2$. Соответственно время запаздывания сигнала на этих участках при скоростях распространения V_1 и V_2 , будет

$$\text{оцениваться как } t_1 = \frac{2r_1}{V_1} \quad (6) \text{ и } t_2 = \frac{2r_1}{V_1} + \frac{2(r_1 - r_2)}{V_2}.$$

При соблюдении условия $r_1 \gg r_2$, будем считать, что расстояние между точками 1,5 и 6,4 приблизительно соответствуют r_1 .

Сигнал на выходе сейсмоприемника для этой модели будет равен:

$$U = \{ \Phi_r \Phi_{12} R_1 \Phi_{24} + I \Phi_r \Phi_{15} \Phi_{23} R_2 \Phi_{36} \Phi_{64} \} \Phi_{cp} + [N_{ш} \Phi_{cp}^2]^{1/2} \quad (8)$$

При выполнении условия (2.7), уравнение (2.8) можно записать так:

$$U = \{ \Phi_r \Phi_{12} R_1 \Phi_{24} + I \Phi_r \Phi_{15} \Phi_{23} R_2 \Phi_{36} \Phi_{64} \} \Phi_{cp} + [N_{ш} \Phi_{cp}^2]^{1/2} - U_c + U_{cp} + U_{ш} \quad (9)$$

Поскольку сигнал первого вступления в точку приема определяет в данном случае синхронную помеху, а сигнал второго вступления, отраженный от второго слоя в точке 3, является полезным и приходит с запаздыванием t_2 , то, пользуясь уравнением (9), его можно выделить в чистом виде путем деления в спектральной форме второго члена фигурной скобки (9) на первый. В результате имеем:

$$\Phi_{36} = \Phi_{53} \frac{R_2}{R_1} \Phi_{64} \quad (10)$$

т.е. получаем в чистом виде ПФ второго слоя, откуда следует, что искомое отношение сигнал/шум по мощности будет равно:

$$q = \left(\frac{C}{Ш} \right)_p = \frac{R_2}{R_1} \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |F(\omega) \Phi_{53}^2(\omega) \Phi_{64}^2(\omega)| d\omega}{N_{ш}(\omega_2 - \omega_1)} \quad (11)$$

где $[\omega_1, \omega_2]$ – частотный интервал сигнала, $(\omega_2 - \omega_1)$ – полоса рабочих частот, $N_{ш}$ – спектральная плотность мощности некоррелированного шума.

Отношение коэффициентов отражения R_2/R_1 определяется через отношение модулей амплитуд сигналов на временах задержки t_1 и t_2 , т.е.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{[U(t_2)]}{[U(t_1)]}$$

Введение в модель рис. 1 третьего и других слоев с четко выраженными границами не меняет суть дела, поскольку речь идет об отделении полезного сигнала, поступающего с максимально возможной глубины, от синхронной помехи формируемой первым неоднородным слоем. Таким образом, алгоритм определения отношения сигнал/шум сводится к определению спектральных характеристик сигналов, поступающих от ближайших к источнику сейсмоприемников. Далее путем деления спектральных характеристик последнего по времени сигнала на спектральные характеристики первого отражения, определяют полезную составляющую сигнала. Интегрируя по частоте результат деления, определяют мощность полезного сигнала. Отношение мощности полезного сигнала к мощности шума в полосе частот этого сигнала определяет искомое отношение сигнал/шум.

Физически такой алгоритм позволяет исключить из полезного сигнала влияние неоднородного верхнего слоя с учетом принятых выше допущений.

$$\text{Заметим, что величина } \frac{1}{2\pi} N_{ш}(\omega_2 - \omega_1) = P_{ш} = \sigma_{ш}^2,$$

т.е. знаменатель (11) может быть определен через дисперсию шумов в полосе пропускания приемника.

Увеличение числа слоев в геологическом разрезе по мере удаления сейсмоприемников от источника возбуждения приводит к необходимости модифицировать алгоритм (11) с учетом появления реверберационных и преломленных волн в верхних слоях Земли.

Частотно-зависимое поглощение сейсмических волн будем учитывать множителем поглощения, а запаздывание – множителем $e^{i\omega t}$, где $e^{i\omega t}$ – комплексная частота, t – время запаздывания на участке распространения сигнала.

На рис. 3 изображен трехслойный разрез и лучевые траектории формирования наблюдаемого сигнала на выходе двух соседних сейсмоприемников.

Синхронная помеха в виде наложения реверберационной и преломленной волн формируется первым слоем.

На ближайший к излучателю сейсмоприемник в точке 7 поступает от всех слоев лишь переотраженный сигнал продольной и поперечной волн, на второй сейсмоприемник, произвольно удаленный от излучателя на расстояние x_2 поступают как

синхронные помехи, формируемые первым слоем, так и полезные сигналы первого отражения.

Эквивалентная системная модель задачи представлена на рис. 4.

Передаточные функции модели рис. 3 запишем как:

$$\Phi_{12}\Phi_{27} = \Phi_{17}e^{-\mu_{17}}; \tau_2 = \frac{2r_1}{V_1}, \quad (12)$$

$$\Phi_{13}\Phi_{37} = \Phi_{17}e^{-\mu_{17}}; \tau_2 = 2\left(\frac{r_1}{V_1} + \frac{r_3 - r_1}{V_2}\right), \quad (13)$$

$$\Phi_{14}\Phi_{47} = \Phi_{17}e^{-\mu_{17}}; \tau_4 = \frac{r_1}{V_1} + \frac{r_3 - r_1}{V_2} + \frac{r_{34}}{V_3}. \quad (14)$$

Реверберационная помеха двукратного отражения в первом слое:

$$\Phi_{12}\Phi_{27}\Phi_{78}\Phi_{89} = \Phi_{19}e^{-\mu_{19}}; \tau_{219} = \frac{4r_1}{V_1}. \quad (15)$$

ПФ реверберационной помехи трехкратного отражения первого слоя можно записать в виде:

$$\Phi_{3p19} = \Phi_{12}^6e^{-\mu_{319}}; \tau_{319} = \frac{6r_1}{V_1}. \quad (16)$$

ПФ сигнала преломленной волны в первом слое запишем приближенно в виде:

$$\Phi_{1719} = \Phi_{12}^2\Phi_{22}e^{-\mu_{1719}}; \tau_{1719} \approx \frac{2r_1}{V_1} + \frac{x_2}{V_1}, \quad (17)$$

где Φ_{22} , V_{11} - соответственно ПФ и скорость распределения преломленной волны. Остальные

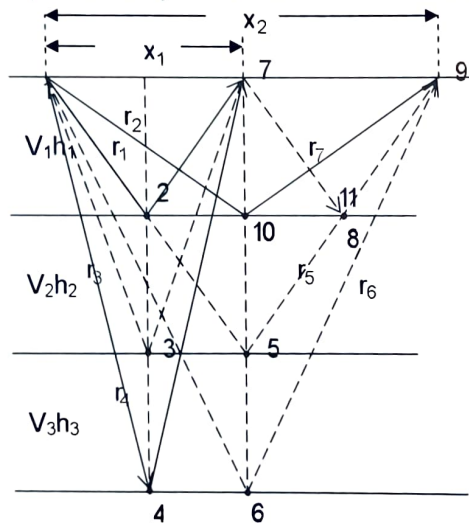


Рис. 3. Формирование сигнала в трехслойной модели. 1-10 - точки отражения и приема; 11 - преломленная волна в первом слое; V_i, h_i - соответственно скорости распространения сигналов и мощность слоев; r_i - длина пути сигнала в слое; x, x_2 - расстояние между источником и сейсмоприемниками

ПФ определяются аналогичным образом.

Если интенсивность преломленной волны невелика по сравнению с реверберационной (РБ), то РБ помеху можно восстановить через соотношение (16) с оценкой кратности ее запаздывания по отношению к запаздыванию сигнала от полезного слоя.

По рис. 3 можно оценить кратность запаздывания РБ помехи.

Условие положения на полезный сигнал i -го слоя РБ помехи:

$$\tau_{PB} = \tau_i \quad (18)$$

Где, например, для сигнала второго слоя:

$$\tau_i = \tau_5 = \frac{2r_5}{V_2} \quad (19)$$

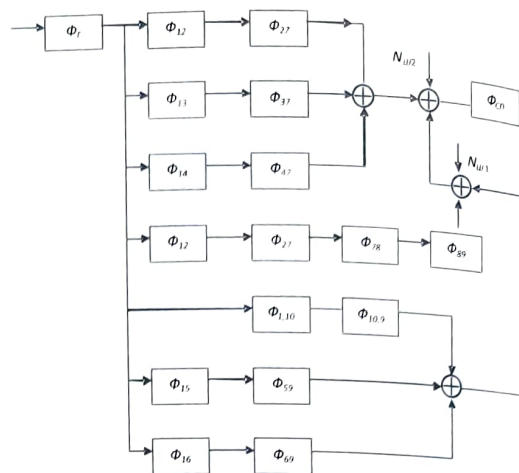


Рис. 4. Системная модель для трехслойной модели.

Для третьего слоя

$$\tau_i = \tau_6 = \frac{2r_6}{V_3}, \quad (20)$$

где V_2 и V_3 - эффективные скорости распространения сигналов до точек отражения 5 и 6 с учетом скоростей распространения в первом и втором слоях.

Запаздывание РБ помехи:

$$\tau_{Di} = \frac{2kr_1}{V_1}. \quad (21)$$

Здесь k - кратность отражения, которая может быть определена через соотношение: $\frac{\tau_{PB}}{\tau_i}$.

Так для второго слоя:

$$\frac{\tau_{Di}}{\tau_5} = \frac{2kr_1V_2}{V_1 \cdot 2r_5}. \quad (22)$$

Поскольку величины запаздывания сигналов

$\tau_1 = \frac{2r_1}{V_1}$ и $\tau_5 = \frac{2r_5}{V_2}$ известны по результатам приема.

то величина кратности определяется из (22) прямым вычислением. Наличие РБ помехи определяется критерием $k = 1, 3, 5, \dots$, т.е. нечетными числами натурального ряда.

Если получаемое при приеме сигнала отношение (22) соответствует этому критерию, то это означает присутствие в полезном сигнале РБ помехи.

В этом случае с помощью соотношений типа (15) и (16) синтезируется сигнал РБ помехи по данным ПФ первого слоя Φ_{12} , полученной из сигнала ближайшего к излучению сейсмоприемника в точке 7. Затем восстановленная таким образом РБ помеха вычитается из необходимого полезного сигнала, отраженного от интересующего слоя.

Выводы

На основе линейной модели передачи сейсмического сигнала через двухслойный и трехслойный разрез получен алгоритм оценки отношения сигнал/шум, достаточной для определения минимально необходимого числа ударов, заключающийся в спектральном преобразовании сигналов первого и последнего вступления, получаемых на выходе ближайшего к излучателю сейсмоприемника и путем нормировки последнего вступления к первому оценивают уровень полезного сигнала, а уровень шума определяется через их дисперсию в паузе между ударами.

Показаны возможности подавления кратных помех путем синтеза их временной формы, оценки числа кратности отражений и вычитания синтезированной помехи из комбинации с полезным сигналом.