

МЕТОДИКА УСТРАНЕНИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТЕЙ ТРАКТОВ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

М.Н. Журавский, к.т.н. И.В. Терещенко, О.И. Солонец
(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

Рассмотрены основные систематические ошибки в трактах обработки, влияющие на определение параметров сейсмического сигнала. Предложена методика коррекции сейсмических сигналов путём использования фильтров с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), обратной трактам обработки. Проанализированы возможности применения адаптивных систем обработки.

Решение довольно большого круга проблем сейсмологии (таких, как определение направления распространения сейсмических волн, трансформация волн на пути их прохождения и т. д.) основано на использовании нескольких идентичных по своим АЧХ сейсмических каналов. Требования идентичности относятся как к сейсмографам трёхкомпонентного комплекса одной станции, так и к сейсмографам целого ряда наблюдательных пунктов, входящих в определённую систему мониторинга [2]. Представляет интерес задача создания идентичных сейсмических каналов для повышения точности определения параметров источников геофизических возмущений природного и техногенного характера.

Устройства сейсмической регистрации относятся к классу пассивных систем обнаружения и измерения координат геофизических явлений природного или техногенного характера. В большинстве случаев при формировании диаграммы направленности группы сейсмоприёмников априорно считается, что все сейсмические каналы являются идентичными (обладающими одинаковыми комплексными коэффициентами передачи трактов прохождения сигналов в цепях обработки).

Для оценки влияния систематических ошибок, возникающих в приёмных трактах сейсмического канала, были проведены исследования математической модели реальной группы сейсмоприёмников, состоящей из 24 однотипных сейсмических каналов. Были получены характеристики направленности группы для значений скоростей распространения сейсмических волн 10 км/с, что примерно соответствует продольному типу волн (Р). Соответствующий частный пример реализации диаграммы направленности (ДН) для направления по азимуту $Q = 100^\circ$ (что соответствует направлению на испытательный полигон Пакистана) показан на рис. 1.

Сформированные ДН группы после внесения в каналы временных ошибок $\sigma_t = 0,1$ с и $\sigma_t = 1$ с представлены на рис. 2, 3.

Анализ формы полученных ДН показывает, что реальный вид ДН при появлении временных ошибок получает дополнительную изрезанность, увеличивается уровень боковых лепестков и уменьшается максимум главного лепестка ДН. Эти обстоятельства негативно сказываются на определении основных параметров геофизических явлений, хотя при этом наблюдается сужение главного лепестка ДН.

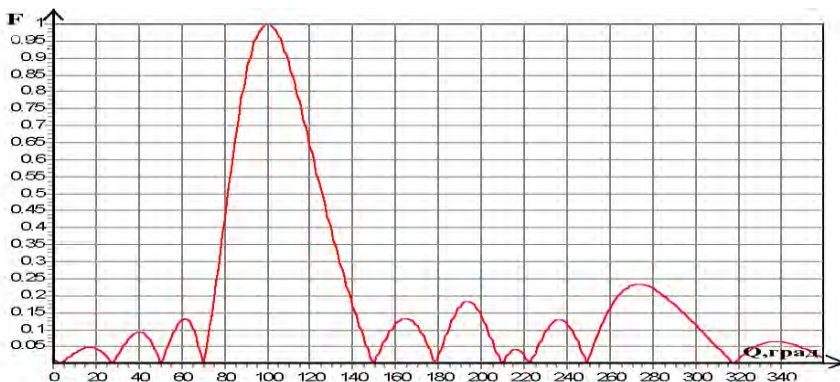


Рис. 1. ДН группы сейсμοприёмников для случая идентичных приёмных каналов ($Q = 100^\circ$, $V = 10$ км/с)

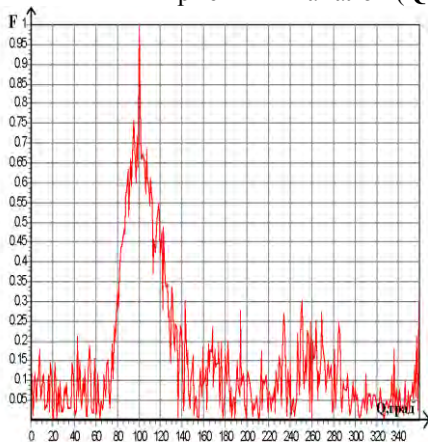


Рис. 2. ДН группы сейсμοприёмников ($Q = 100^\circ$, $V = 10$ км/с, $\sigma_t = 0,1c$)

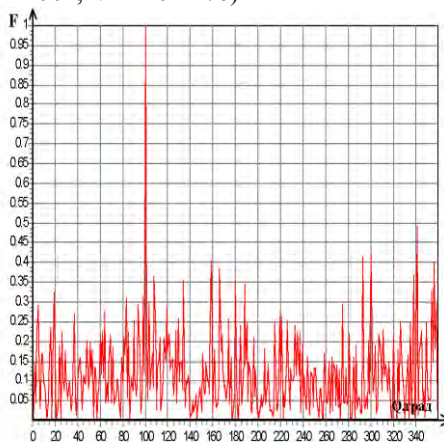


Рис. 3. ДН группы сейсμοприёмников ($Q = 100^\circ$, $V = 10$ км/с, $\sigma_t = 1$ с)

На основе использования известного алгоритма определения азимута прихода сейсмической волны [7] оценивалось влияние неидентичностей частотных характеристик сейсмических трактов, входящих в исследуемую пространственную группу, на точность оценки параметров геофизических явлений.

Анализ модельного эксперимента по оценке точностных характеристик показывает, что ухудшение СКО определения временных задержек до 1 секунды (имеющей место в настоящее время при ручной обработке сейсмограмм) приводит к существенному ухудшению СКО оценки азимута на источник геофизического возмущения.

Для выбора метода коррекции сейсмического канала необходимо оценить степень влияния характеристик устройств, формирующих сейсмический канал, на результаты прохождения и регистрации (записи) сейсмических сигналов.

При некоторых предположениях и допущениях можно считать, что каждая сейсмограмма представляет собой выходной сигнал, прошедший ряд последовательно включенных блоков, каждый из которых учитывает отдельный эффект, описываемый своей частотной характеристикой. Влияние таких приборов на результаты регистрации может быть устранено с помощью одного из следующих способов [4]: способа решения дифференциальных уравнений, способа преобразования Фурье, способа свертки и способа, основанного на использовании рекурсивного фильтра. Исследования проводились для получения качественных оценок и определения степени целесообразности коррекции сейсмических сигналов после прохождения трактов обработки. Использовался способ преобразования Фурье в силу простоты реализации в реальном масштабе времени.

Исследование воздействия АЧХ сейсмического канала на результаты записи геофизических возмущений природного и техногенного характера проводились в несколько этапов.

На начальном этапе ставилась задача описания сейсмических сигналов и выбора адекватных математических моделей, соответствующих реальным колебаниям Земной поверхности (геофизическому явлению).

Решающим фактором, влияющим на выбор математической модели сейсмического сигнала, является то, что при колебаниях, вызванных геофизическими возмущениями, первая производная смещения непрерывна, а разрыв терпит вторая производная или производная более высокого порядка. Этим требованиям соответствует импульс Берлаге [3]. Его математическое выражение имеет вид (1):

$$\begin{cases} X = X_{\max} te^{-pt} \sin \frac{2\pi t}{T} & \text{при } t \geq 0; \\ X = 0 & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для случая, когда смещение почвы имеет вид внезапно начинающихся синусоидальных колебаний, рационально использовать математическое выражение (2). Для этого случая искажение формы начальной части сейсмической волны аналогично случаю работы короткопериодного сейсмоприёмника типа СКМ:

$$\begin{cases} X = X_{\max} \sin \frac{2\pi t}{T} & \text{при } t \geq 0; \\ X = 0 & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Поэтому при моделировании сейсмических сигналов целесообразно использовать математические выражения (1, 2). Они в полной мере соответствуют реальным колебаниям Земли, вызванным геофизической активностью [3].

Следующий этап исследований предполагал использование реальной сейсмической аппаратуры обработки. Проводилось моделирование прохождения импульса Берлаге через устройства тракта обработки. В качестве такого устройства применялся наземный блок короткопериодного вертикального сейсмического приёмника К-213-СМ. Была экспериментальным путем получена АЧХ этого устройства, которая в дальнейшем использовалась при моделировании прохождения импульса Берлаге через данное устройство.

Результаты моделирования подтвердили, что после прохождения устройства обработки изменяются период и амплитуда в сравнении с входным эталонным сигналом.

Далее проводилось моделирование прохождения импульса Берлаге через тракты не отдельных устройств (К-213-СМ), а всего сейсмического канала. Рассматривалась частотная характеристика аппаратуры вертикального короткопериодного сейсмического канала, в составе сейсмоприёмника КСГ-М, усилителя К-207-С, фильтра К-210-С1. В качестве эталонного сигнала использовалась математическая модель импульса Берлаге.

На рис. 4 показана зависимость уменьшения периода входных колебаний после прохождения трактов обработки сейсмического канала. На рис. 5 показана зависимость уменьшения двойной амплитуды входных колебаний (первого и второго полупериода) после прохождения трактов обработки сейсмического канала.

Из рис. 4 и 5 видно, что после прохождения трактов обработки основные параметры сейсмических сигналов отличаются от реальных, что сказывается на точности определения координат источников возмущения и силы этого события. На данном этапе учёт искажений, вносимых трактами обработки, не проводится.

Это подтвердило необходимость проведения коррекции с целью восстановления сигнала после прохождения трактов обработки.

Было предложено в качестве корректирующего устройства использовать фильтр с АЧХ, обратной отдельным устройствам тракта обработки или всему тракту в зависимости от решаемых задач.

После прохождения устройства с обратной АЧХ скорректированный сигнал имеет следующие характеристики:

- первый полупериод импульса Берлаге после прохождения корректирующего фильтра восстанавливался с точностью до 98 % в сравнении с входным эталонным сигналом;

– второй полупериод импульса Берлаге после прохождения корректирующего фильтра восстанавливался с точностью до 95 % в сравнении с входным эталонным сигналом.

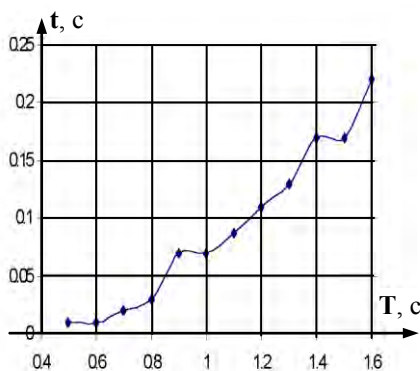


Рис. 4. Изменение периода входных колебаний сейсмического сигнала после прохождения приёмного тракта обработки ($X_{\max} = \text{const}$)

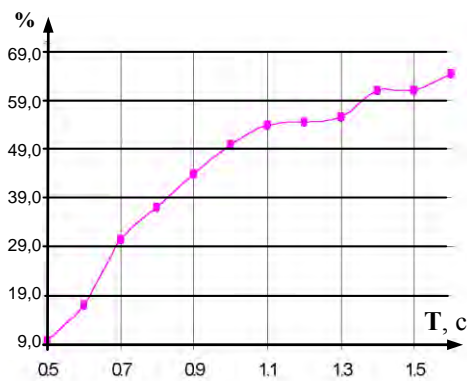


Рис. 5. Изменение амплитуды входных колебаний сейсмического сигнала после прохождения приёмного тракта обработки ($X_{\max} = \text{const}$)

Аналогичные результаты получены при моделировании для случая, когда смещение почвы имеет вид внезапно начинающихся синусоидальных колебаний. Таким образом, предположения о целесообразности применения обратной АЧХ с целью коррекции входного сейсмического сигнала полностью подтвердились.

Результаты проведённых исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Выбор кривых увеличения сейсмографов, вариантов установки, регулировка АЧХ и ФЧХ комплектов сейсмической аппаратуры (короткопериодных, широкополосных, длиннопериодных) не может в полном мере решить проблему выбора оптимальных параметров сейсмических каналов.

2. Приём и обработка сейсмических сигналов производится в условиях априорной неопределённости некоторой системой пространственно-временной обработки [6]. Она должна формировать на выходе сигнал, являющийся оценкой сигнала на входе и асимптотически стремящийся к оптимальному значению. Такими устройствами являются устройства с корреляционными обратными связями. В процессе их функционирования по мере изменения внешних условий выборочная корреляционная матрица и соответственно весовой вектор должны постоянно обновляться, что позволяет системе приспосабливаться (адаптироваться) к изменяющейся обстановке. Адаптивная система, которая, используя регулярный процесс поиска, постоянно ищет оптимум в пределах допустимого класса возможностей, имеет преимущества по сравнению с неизменяемой системой [8].

3. В настоящее время в сейсмологии остро стоит вопрос о необхо-

димости обеспечения идентичности частотных характеристик (для случая прихода слабых сейсмических сигналов от источников различного происхождения с дальней зоны при регистрации их группой сейсмоприёмников). В этом случае необходимым условием идентификации геофизического явления является, прежде всего, идентичность АЧХ и ФЧХ всей группы сейсмоприёмников, что сложно в виду необходимости одновременного учёта большого количества факторов.

В случае же применения адаптивных систем изначально добиваться полной идентичности каналов нет необходимости. За счет небольшой рассогласованности каналов (незначительные отклонения частотных характеристик, различная чувствительность отдельных каналов) при появлении сейсмического сигнала один из каналов можно считать каналом, обладающим необходимой частотной характеристикой, к которой необходимо подстраиваться остальным каналам на данный момент.

Таким образом, перед адаптивными системами открываются широкие перспективы в области обработки сигналов геофизических явлений природного и искусственного происхождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хьюлман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, – 1984. – 384 с.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1,2. Пер с англ. – М.: Мир, – 1983. – 435 с.
3. Пасечник И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях – М.: Наука, 1970. – 193 с.
4. Богданов В.И., Грайзер В.М. Определение остаточного смещения почвы по сейсмограммам // ДАН СССР. – 1976. – Т. 229, № 1. – С. 59 - 62.
5. Родин Г. Сейсмология ядерных взрывов. – М.: Мир, 1974. – 150 с.
6. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 350 с.
7. Гуков В.М., Пастушенко Н.С., Солонец А.И., Фролова Т.Ю. Методика оценки азимута на геофизическое явление по результатам регистрации сейсмических волн // Зб. наук. праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2000. – Вип. 4(30). – С. 180 - 185.
8. Караваяев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.

Поступила 15.07.2002

ЖУРАВСКИЙ Максим Николаевич, адъюнкт ХВУ. В 1997 году окончил военный факультет радиоэлектроники при Житомирском ИТИ. Область научных интересов – цифровая обработка сейсмических сигналов, применение адаптивных систем в сейсмологии.

ТЕРЕЩЕНКО Игорь Владимирович, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., доцент кафедры ХВУ. В 1984 году окончил Минское ВИЗРУ. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов в радиолокации, фазированные антенные решётки.

СОЛОНЕЦ Алексей Иванович, ст. инженер кафедры ХВУ. В 1997 году окончил ХВУ. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, применение пассивной радиолокации в сейсмологии.