

# SEISMIC SIGNALS PRELIMINARY PROCESSING INFLUENCE ANALYSIS ON OBJECTS CLASSIFICATION QUALITY

*Yury V. Morozov, Mikhail A. Rajfeld, Alexandr A. Spektor*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

## **Abstract**

The investigation results for object classifier based on observed seismic signal envelope spectral components statistical analysis are presented. Spectral components are considered to be the classes criterions.

*Keywords: classification, seismic signal, envelope*

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА КАЧЕСТВО КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

*Морозов Ю.В., Райфельд М.А., Спектор А.А.*

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Представлены результаты исследования классификатора объектов, основанного на статистическом анализе спектральных компонент огибающей наблюдаемого сейсмического сигнала. Спектральные компоненты рассматриваются в качестве признаков классов.

*Ключевые слова:* классификация, сейсмический сигнал, огибающая.

**Введение.** Измерение и анализ сейсмических сигналов в системах пассивной сейсмической локации требуется для решения задач обнаружения, трассировки и классификации движущихся объектов, которые оказывают механическое воздействие на грунт. Как правило, принятые сейсмические сигналы подвергаются предварительной обработке для их представления в форме, пригодной для решения упомянутых задач. В настоящей работе рассматривается сейсмическая классификация объектов

Классификации объектов посвящено много работ начиная с 70х годов прошлого века до сегодняшних дней [2-5]. В [2] изложены теоретические основы классификации как распознавания образов. Выделение признаков, по которым классифицируются сейсмические сигналы, рассмотрено в [3]. Практическая реализация классификации сейсмических сигналов изложена в [4,5]. Одним из примеров классификации сейсмических сигналов является классификация ударных воздействий на земную кору от взрывов, землетрясений, падения метеоритов, ударов молний и т.д. [4]. Другим примером является сейсмическая локация на морском дне для различения разных видов китов в целях контроля за их популяцией [5].

Рассматриваемая в настоящей работе классификация ориентирована на использование в пассивном сейсмическом локаторе (ПСЛ), существенной особенностью которого, отличающей его от приведенных выше примеров, является обработка сигналов и принятие решения в реальном масштабе времени. Рассматриваются 4 класса сейсмоактивных объектов: одиночный человек, группа людей, крупное животное, например лошадь, и автомобиль.

**Постановка задачи.** Целью исследований является анализ влияния предварительной обработки сейсмических сигналов в системе ПСЛ на качество классификации.

Сейсмический сигнал является откликом сейсмического приемника на непрерывное или импульсное воздействие объекта, на которое накладывается сейсмический фон. Для ослабления фона и подготовки сигнала к классификации применяется адаптивная декорреляция, детектирование, сглаживание и наложение окна. Рассмотрены два типа детекторов: квадратичный и детектор на основе преобразования Гильберта, а также два типа окон: прямоугольное и Хэннинга.

**Спектральная классификация на основе метода максимального правдоподобия.** Система пассивной сейсмической локации обычно состоит из группы сейсмических датчиков, которые помещены в грунт; часто применяемая схема размещения показана на рис. 1. Каждому датчику присвоен свой порядковый номер. Расстояние между соседними датчиками определяется сеймопроводностью грунтов и в среднем составляет 10-15 м. При появлении сейсмоактивного объекта, оказывающего воздействие на грунт, порожденные им сигналы воспринимаются одним или несколькими датчиками. Сигналы этих датчиков, образующих активную группу, подвергаются предварительной обработке для последующей классификации.

Частотный спектр сейсмических сигналов в ПСЛ обычно ограничен частотами 120-150 Гц. Поэтому частота дискретизации сейсмических сигналов лежит в диапазоне 400-800 Гц. Приводимые в работе результаты опирались на экспериментальные записи сигналов, полученных в изделии ПСЛ с частотой взятия отсчетов 600 Гц. Для дальнейшей обработки отсчеты объединяются в циклы по 1000 отсчетов, что соответствует интервалу времени 1.67 с. Структурная схема предварительной обработки приведена на рис. 2. Она включает в себя

декорреляцию, детектирование, сглаживание огибающей сейсмического сигнала и наложение окна. Декорреляция или выбеливание осуществляется для ослабления сейсмического фона [6]. Затем путем детектирования выделяется огибающая сейсмического сигнала. Наконец, огибающая подвергается скользящему сглаживанию путем усреднения некоторого количества соседних отсчетов. Задачей сглаживания является дальнейшее ослабление флуктуаций, вызванных действием сейсмического фона. Для объектов с импульсным воздействием на грунт сглаживание приводит к относительному ослаблению выбросов фона, что способствует более качественной передаче сигнальных импульсов. Для этого, конечно, размер «окна» не должен превышать длительность импульсного сигнала. Как правило, интервал усреднения составляет от 15 до 50 отсчетов. Сглаженная огибающая выбеленного сейсмического сигнала является основой для выделения классификационных признаков.

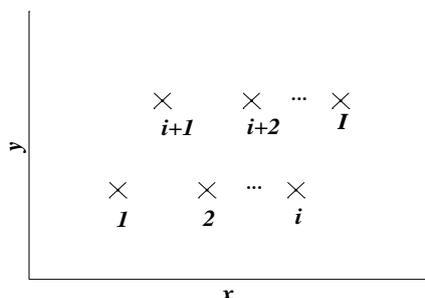


Рис. 1. Размещение сейсмических датчиков в системе пассивной сейсмической локации.

Временная структура сигнала человека весьма близка к периодической последовательности импульсов. Признаки периодичности имеются у сигналов группы людей и крупного животного.

Для класса человек в цикле длительностью 1000 отсчетов (1.67 с) укладывается примерно три импульса. При движении группы людей можно также отметить характерную частоту импульсов, свойственную движению человека. Вместе с тем, из-за несинхронности движения в группе, эта характерная частота выражена слабее, за счет чего в спектре усиливаются другие компоненты. Одним из проявлений группового сигнала является удлинение импульсов. В случае сигнала животного в одном цикле около 6 импульсов, что может использоваться как существенное отличие от других импульсных объектов. Сигнал автомобиля является непрерывным, что значительно отличает его от сигналов других классов, его огибающая сначала плавно нарастает (при приближении автомобиля), а затем плавно убывает.

После сглаживания образуется сигнал, который подчеркивает характерные свойства того или иного объекта [7]. С учетом этих свойств формируются классификационные признаки во временной или в частотной области. Для ослабления краевых эффектов при вычислении спектра сглаженный сигнал умножается на оконную функцию.

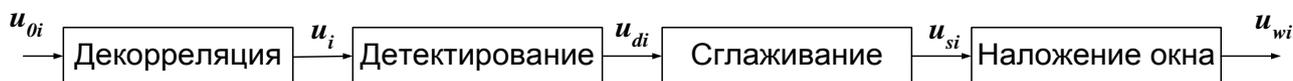


Рис. 2. Структурная схема предварительной обработки сейсмических сигналов.

В настоящей работе рассмотрены два типа детектора: квадратичный детектор и детектор на основе преобразования Гильберта, а также две оконные функции: прямоугольная и Хэннинга.

Квадратичный детектор описывается выражением

$$u_{di}(m) = [u_i(m)]^2,$$

где  $m$  – дискретное время.

Достоинством данного детектора является простота реализации. В качестве недостатка следует отметить усиление отсчетов с большим уровнем сигнала и одновременное ослабление с малым уровнем, что приводит к искажениям огибающей.

В качестве альтернативы рассматривается детектор на основе преобразования Гильберта

$$u_{di}(m) = \left| (1/M) \sum_{n=0}^{M/2} U_i(n) H(n) \exp(2\pi jmn/M) \right|,$$

где  $U_i(n)$  – результат быстрого преобразования Фурье (БПФ) сигнала  $u_i(m)$ ;  $H(n)$  – коэффициент передачи фильтра, формирующего аналитический сигнал,  $M$  – длительность цикла.

Оконная функция имеет следующий общий вид:

$$w(m) = a_0 \left( 1 - a_1 \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right) + a_2 \cos\left(4\pi \frac{m}{M}\right) \right),$$

где  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = 0$  для прямоугольного окна, а  $a_0 = 0.5$ ,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 0$  – для окна Хэннинга.

Каждый цикл из 1000 отсчетов сглаженного сигнала подвергается быстрому преобразованию Фурье для формирования амплитудного спектра огибающей. Особенности сигналов разных классов во временной области порождают соответствующие особенности в частотной области [7].

С учетом приведенных выше параметров системы ПСЛ, с помощью проводились эксперименты, относительные частоты  $j$  связаны с абсолютными значениями  $f$  соотношением  $f = 0.6j$  Гц. Анализ спектров всех классов объектов показывает, что характерные особенности классов отображаются в частотах не выше 6 Гц, что в пересчете в дискретный спектр при обозначенных параметрах соответствует относительной частоте с номером  $j = 10$ .

У человека спектр имеет яркие признаки периодичности. У группы людей эта периодичность является менее выраженной. У животного характерный максимум находится на частоте  $j = 6$ . Спектр автомобиля монотонно убывает.

В качестве классификационных признаков приняты гармонические составляющие нормированного амплитудного спектра огибающей

$$x_j = \hat{x}_j / \sum_{k=0}^J \hat{x}_k, \quad 0 \leq j \leq J \quad (1)$$

где  $\hat{x}_j$  –  $j$ -я ненормированная спектральная составляющая;  $J_{\max}$  – полное количество спектральных отсчетов для цикла из 1000 временных отсчетов;  $J = 10$  – количество спектральных составляющих, участвующих в классификации, начиная с первой.

Поскольку  $x_j$  являются случайными величинами, каждая из них имеет свою плотность распределения вероятностей  $p(x_j)$ . Полагая элементы спектра некоррелированными, [8]. Следовательно, для каждого класса  $c$  совместное распределение признаков определяется произведением плотностей распределения по всем временным циклам и по всем датчикам, участвующим в классификации:

$$p_c(X) = \prod_{m=1}^M \prod_{i=1}^I \prod_{j=0}^J p_c(x_j)^{(m,i)} \quad (2)$$

где  $X$  – вектор, элементами которого являются  $J + 1$  спектральные составляющие, измеренные в  $M$  рабочих циклах на  $I$  датчиках, участвующих в классификации.

Решение выносится в пользу того класса  $c$ , для которого статика (2) максимальна.

**Экспериментальные исследования.** Предложенный классификатор был исследован путем компьютерного моделирования в среде Matlab для нескольких вариантов предваритель-

ной обработки сейсмических сигналов. На рис. 3 приведены результаты предварительной обработки сейсмических сигналов для детектора Гильберта и прямоугольного окна для четырех рассматриваемых классов:  $c = 1$  (человек),  $c = 2$  (автомобиль),  $c = 3$  (группа людей),  $c = 4$  (животное).

На рис. 4 и 5 соответственно приведены результаты классификации сейсмических сигналов для наиболее трудно различимых объектов типа «Человек» и «Группа» для детектора Гильберта и окна Хэннинга вместе с соответствующими выделенными и сглаженными сигналами. Сглаженный сигнал объекта «Группа» имеет большее количество локальных максимумов, чем объект типа человек.

В таблице приведены результаты классификации сейсмических объектов для квадратичного детектора и детектора на основе преобразования Гильберта при прямоугольном окне, а также для детектора Гильберта при окне Хэннинга. Эти результаты представлены в виде количества ошибок классификации по отношению к общему количеству решений о принадлежности сейсмического объекта некоторому классу. В эксперименте использовались записи сейсмических сигналов, полученные на полигоне НГТУ.

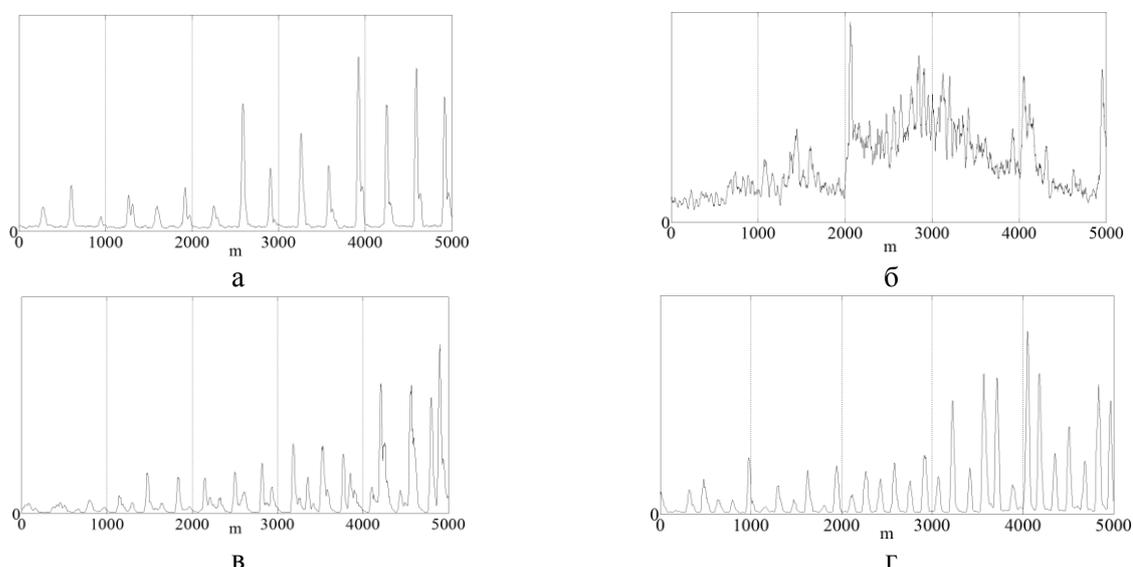


Рис. 3. Сглаженные сигналы сейсмоактивных объектов каждого класса после детектора Гильберта для разных классов: а –  $c = 1$ ; б –  $c = 2$ ; в – ; г –  $c = 4$ .

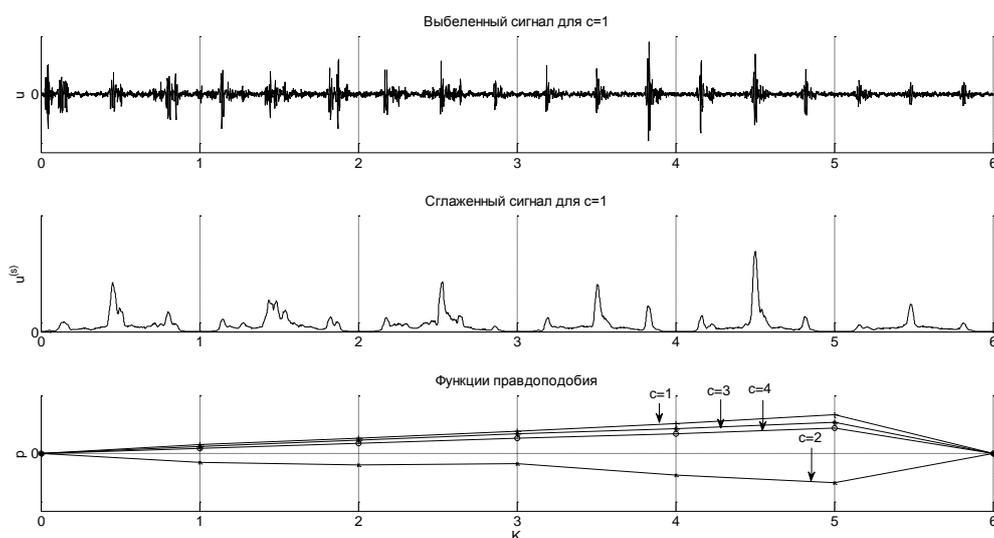


Рис. 4. Пример классификации для класса  $c = 1$  при детекторе Гильберта, интервале усреднения 31 и оконной функции Хэннинга.

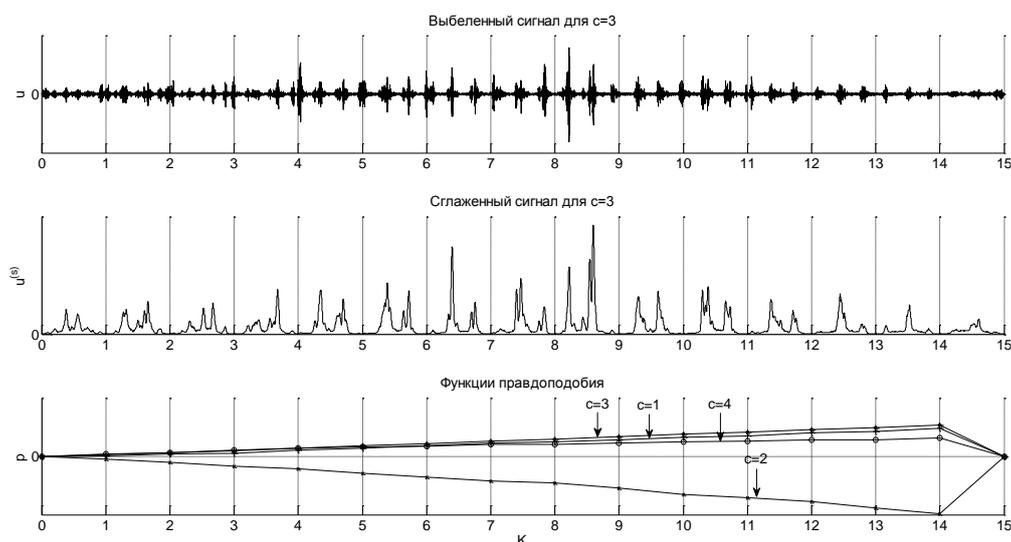


Рис. 5. Пример классификации для класса  $c=3$  при детекторе Гильберта, интервале усреднения 31 и оконной функции Хэннинга.

Результаты классификации.

детектор, окно класс	Квадратичный, Прямоугольное	Гильберта, Прямоугольное	Гильберта, Хэннинга
c=1	25 из 36	25 из 36	0 из 36
c=2	2 из 56	2 из 56	0 из 56
c=3	3 из 51	3 из 51	1 из 51
c=4	1 из 46	1 из 46	0 из 46

В качестве классификационных признаков использовались спектральные компоненты  $j = 2 \dots 10$ . Использование окна Хэннинга способствует существенному снижению количества ошибок классификации для класса «Человек». Для остальных классов правильная классификация сохраняется.

**Заключение.** Исследование влияния предварительной обработки сейсмических сигналов на качество их классификации показало, что применение детектора Гильберта и окна Хэннинга способствует существенному снижению количества ошибок классификации объектов с импульсным воздействием на грунт. Малое количество ошибок классификации объектов с непрерывным воздействием на грунт сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красовский А.А. Цифровая обработка в ZETLAB при идентификации параметров сейсмического сигнала // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 70-76.
- [2] Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979. 368 с.
- [3] Козлов Э.В., Левковская Т.В. Выделение информативных признаков сигналов сейсмических сенсоров пассивной локации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. №6. С. 36-41.
- [4] Nepeina K. Automatic post processing algorithm for passive seismic monitoring data // Journal of Physics: Conference Series 510 (2014) 01207. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/510/1/012007/meta> (дата обращения 8.06.2017).
- [5] Matias L., Harris D. A single station method for the detection, classification and location of fin whale using ocean-bottom seismic stations // J. Acoustic Society of America. 2015. Vol. 138. P. 504-520.
- [6] Соколова Д.О., Спектор А.А. Классификация движущихся объектов по спектральным признакам сейсмических сигналов // Автометрия. 2012. № 5. С. 112-119.
- [7] Morozov Y. V., Rajfeld M. A., Spector A. A., Analysis of seismic signals preliminary processing influence on classification results // 12 International forum on strategic technology (IFOST 2017) : proc., Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017. Ulsan, 2017. Vol. 1. P. 138-142.