

УДК 004.931

**ВЫДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ  
СИГНАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ**

**Э.В. Козлов, Т.В. Левковская**

Рассматривается анализ сейсмических сигналов в интеллектуальных системах пассивной локации с точки зрения выделения информативных признаков. Описывается разработанный алгоритм выделения информативных признаков сейсмических сигналов для движущихся объектов. Результаты тестирования алгоритма позволяют сделать заключение о целесообразности его использования в интеллектуальных системах охраны объектов и территорий.

**Ключевые слова:** сейсмические сигналы, информативные признаки, классификация движущихся объектов.

**Введение**

Одним из актуальных направлений развития интеллектуальных сейсмических систем охраны периметра является повышение достоверности обнаружения и классификации типа нарушителя (человек, группа людей, наземная техника) в условиях воздействия многочисленных помеховых факторов природно-климатического, биологического и техногенного характера [1–4].

При движении человека либо техники возникают сейсмические волны, которые можно условно разделить на две составляющие – вертикальную и горизонтальную. Горизонтальная сейсмическая волна (поверхностная волна, рэлеевская волна) распространяется вдоль границы раздела грунта и воздуха. Именно она регистрируется сейсмическими сенсорами и в дальнейшем подвергается обработке. Распространение волны вдоль границы раздела сред обуславливает ее характеристики, которые зависят от многих факторов: вида грунта и его состояния, анизотропии, состояния подстилающей поверхности и других факторов. При анализе такого рода сигналов необходимо учитывать наличие естественных микросеймов (строительство, деревья, ЛЭП, дороги). Таким образом, полезный сигнал от нарушителя возникает в условиях многочисленных помеховых факторов [2, 3]. Причем диапазоны основных характеристик полезных сигналов и помех, как правило, перекрываются.

По поверхностной волне можно отследить расстояние до нарушителя при использовании нескольких сейсмодатчиков (или косы сейсмических сенсоров), однако в настоящей работе такая цель не ставилась.

### Описание алгоритма выделения информативных признаков сейсмических сигналов

Целью данной работы является разработка алгоритма выделения информативных признаков для классификации движущихся объектов (человек, группа людей, автомобиль) по сигналам сейсмических сенсоров пассивной локации. Информативные признаки должны быть инвариантны к шумам реальной фоновой обстановки. Немаловажным фактором является время выполнения алгоритма.

На рис. 1 представлена общая схема алгоритма обработки сигналов в экспериментальной системе пассивной локации.

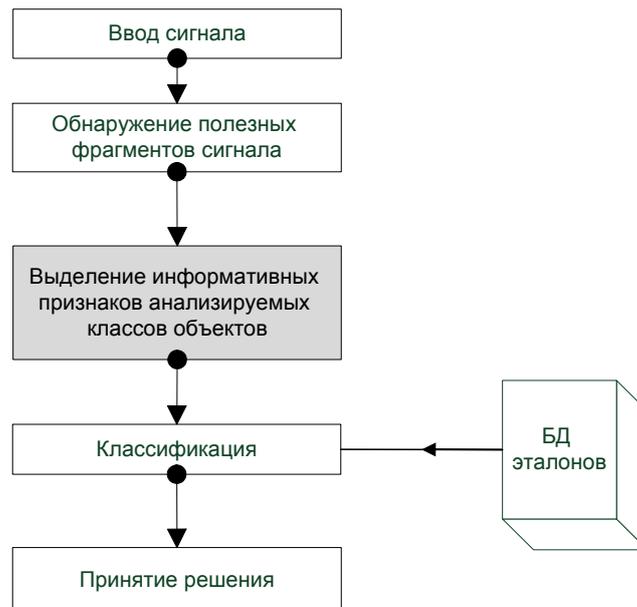


Рис. 1. Основные этапы обработки сигналов в экспериментальной системе пассивной локации

Процесс обработки сейсмических сигналов можно разделить на этапы:

1. ввод сигналов, предварительно записанных в файл;
2. обнаружение движущихся объектов (выявление отличий полезных сигналов и окружающего фона) [5];
3. формирование информативного и компактного признакового пространства;
4. в процессе классификации выполняется сравнение информативных признаков обнаруженных фрагментов полезного сигнала с эталонами;
5. в качестве решения выбирается тип объекта, для которого количественная оценка соответствия с эталоном максимальна.

### Характеристики сейсмических сигналов

При отсутствии движущегося объекта на выходе сейсмического сенсора присутствуют случайные сигналы (сейсмические шумы), которые накладываются на квазипериодические импульсные сигналы, возникающие при движении человека. Увеличение и спад амплитуды огибающей последовательности импульсов по мере приближения человека к сенсору и при удалении от него осуществляются по закону, близкому к экспоненциальному. Скорость нарастания и убывания сейсмического сигнала, возникающего при движении наземной техники, гораздо медленнее, чем при движении человека или группы людей. При этом полезный сигнал характеризуется отсутствием ярко выраженной периодичности.

Спектр сигнала определяется типом объекта, скоростью движения, расстоянием между движущимся объектом и местом установки сейсмического сенсора, зоной обнаружения (чувствительностью) сейсмоприемника [1]. Спектральные составляющие сигнала в диапазоне частот от 0 до 80 Гц обусловлены воздействием на грунт одиночного нарушителя. При движении группы людей спектр сигнала сейсмического сенсора расширяется в высокочастотную область. Спектр сигнала, вызванного движением наземной техники, перекрывает всю область полезных сигналов без характерных максимумов. Спек-

тральные составляющие свыше 200–300 Гц практически малоразличимы на фоне естественных микросейсмов, поскольку приповерхностный слой грунта играет роль фильтра низких частот, т.е. сильнее поглощает высокие частоты.

Анализ характеристик сейсмических сигналов позволяет определить признаковое пространство для классификации движущихся объектов. Для распознавания классов объектов – человек, группа людей, легковой автомобиль – целесообразно использовать спектральное описание в частотном диапазоне до 300 Гц и характеристики периодичности сигнала – количественную оценку и значение периода следования импульсов сейсмических сигналов, фиксируемых при движении человека в зоне обнаружения.

### Анализ периодичности

Для оценки периодичности сигнала широко применяются корреляционные методы, суть которых заключается в сравнении соседних фрагментов сигнала и определении степени их подобия. Степень подобия (оценка периодичности) и значение периода на интервале обнаруженного полезного фрагмента сигнала оцениваются путем расчета и анализа кратковременных автокорреляционной функции (АКФ) или функции среднего модуля разности, использование которых обеспечивает снижение вычислительных и временных затрат по обработке сигналов. Экспериментальные исследования дали достаточно близкие результаты при использовании обоих типов функций.

Период шагов человека составляет в среднем 0,6 с (750 отсчетов сигнала при  $F_{\text{дискр}}=1250$  Гц). Учитывая возможную скорость передвижения объектов, диапазон поиска периодичности сейсмических сигналов целесообразно выбрать 0,2–0,8 с (256–1024 отсчетов). Для реализации автокорреляционных методов длительность анализируемого фрагмента должна быть больше минимум в 2 раза (2048 отсчетов), что ведет к значительным вычислительным и временным затратам по обработке сигналов. Объем вычислений существенно сократится при расчете АКФ по энергии сигнала для заданного интервала времени.

Обнаруженные с помощью разработанного двухступенчатого алгоритма детектирования [5] полезные фрагменты сейсмических сигналов показаны на рис. 2. Вертикальные маркеры соответствуют начальной и конечной границам обнаруженных полезных фрагментов сигналов. Сигналы, оцифровывались с  $F_{\text{дискр}}=1250$  Гц, 16 бит на отсчет, анализировались кадрами длительностью 256 отсчетов (0,2 с) со сдвигом окна анализа на 1/4 (0,05 с).

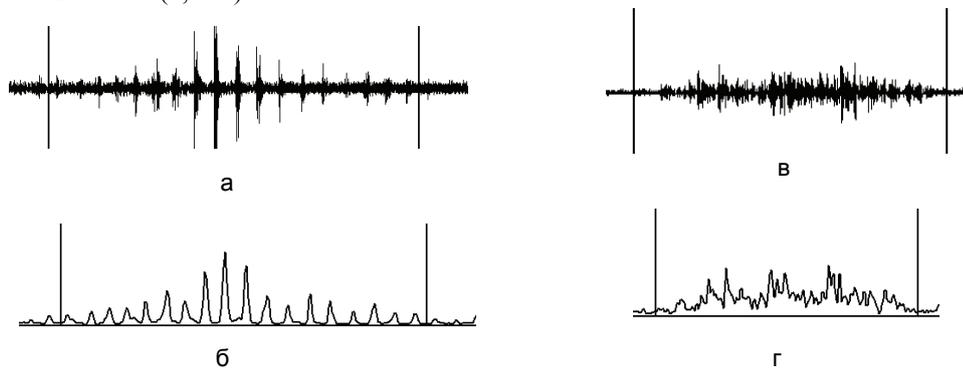


Рис. 2. Результат работы алгоритма детектирования полезного сигнала: от человека – осциллограмма сигнала (а); энергия сигнала (б); от автомобиля – осциллограмма сигнала (в); энергия сигнала (г)

График изменений покadroвых значений энергии сигнала от человека (рис. 2, а, б) имеет квазипериодический характер и содержит информацию о периодичности анализируемого фрагмента сейсмического сигнала. Максимальное значение АКФ в заданном диапазоне поиска периода сигнала, равном 32 кадрам анализа ( $32 \times 64 = 2048$  отсчетов сигнала), является количественной оценкой периодичности сигнала, период сигнала соответствует аргументу кратковременной АКФ, при котором она принимает максимальное значение. В качестве интегральных характеристик периодичности обнаруженного полезного фрагмента сигнала выбирается медианное значение. На данном этапе исследований значения периода сигнала не анализировались.

### Спектральный анализ

Анализ спектрограмм полезных сейсмических сигналов от человека показал, что мгновенные спектры, полученные дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) в моменты времени между импульсами, по форме схожи со спектром окружающего фона. В связи с этим предлагается усредненный спектр рассчитывать как взвешенную сумму мгновенных спектров с учетом покadroвых значений спектральной энергии. Взвешенный таким образом спектр в большей степени содержит информацию о полезных от-

резках (кадрах) сигнала, соответствующих энергетическим всплескам, уменьшая при этом вклад мгновенных спектров на интервалах между импульсами. На рис. 3 изображены нормированные и усредненные путем взвешивания ДПФ-спектры полезных сейсмических сигналов, зарегистрированных при движении человека и легкового автомобиля в зоне обнаружения сенсора.

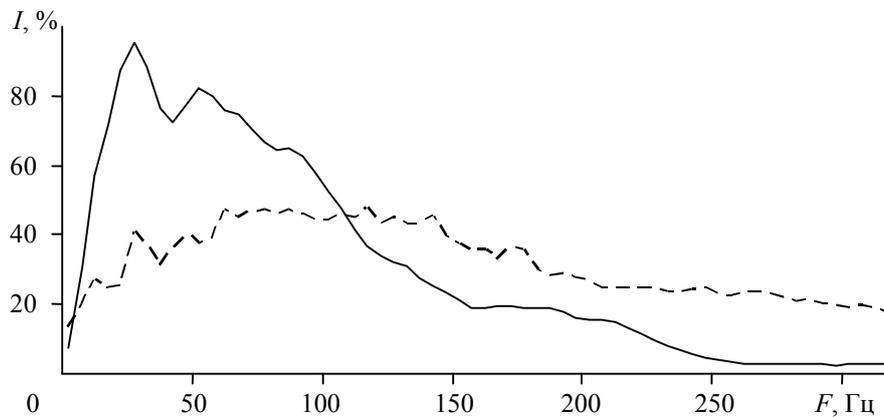


Рис. 3. Нормированные и усредненные путем взвешивания ДПФ-спектры сейсмических сигналов, зафиксированных при движении человека и автомобиля:  
 — идущий человек; - - - движущийся автомобиль

Сравнительный анализ нормированных и усредненных путем взвешивания на интервале обнаруженных фрагментов полезного сигнала ДПФ-спектров, исходных и очищенных от шума сигналов, показывает целесообразность их использования для распознавания анализируемых классов движущихся объектов.

### Результаты исследований

Для проверки работы алгоритма выделения информативных признаков были записаны сейсмические сигналы при движении в зоне обнаружения сенсоров следующих классов объектов: человек, группа людей (3–5 человек), автомобиль. В качестве приемников сигналов были использованы сейсмические сенсорные модули, чувствительный элемент которых — классический точечный преобразователь геофон [4]. В результате обработки сейсмических сигналов было обнаружено 184 полезных фрагмента, из них: 63 — при движении объектов класса «человек», 56 — «группа людей», 65 — «автомобиль». Эталоны анализируемых классов объектов были рассчитаны путем усреднения информативных признаков для 1/3 реализаций. Оценка надежности классификации (отношение правильно распознанных полезных фрагментов сигналов к общему количеству обнаруженных фрагментов, выраженное в процентах) была получена для оставшейся части обнаруженных полезных фрагментов сигналов. В табл. 1–3 приведены результаты классификации движущихся объектов по спектральному описанию, оценке периодичности, обобщенным типам информативных признаков. Следует отметить, что результаты получены для сигналов, зафиксированных при движении одних и тех же объектов в одинаковых климатических условиях.

Представленные в табл. 1–3 результаты демонстрируют достаточно хорошее разделение движущихся объектов «человек» и «автомобиль». Объекты класса «группа людей» занимают промежуточное положение. Использование обоих типов информативных признаков улучшает надежность классификации.

Тип объекта	Эталоны		
	человек	группа людей	автомобиль
человек	<b>80,95</b>	19,05	0,00
группа людей	12,5	<b>73,21</b>	14,29
автомобиль	0,00	24,62	<b>75,38</b>

Таблица 1. Надежность классификации движущихся объектов по спектральному описанию

Тип объекта	Эталоны		
	человек	группа людей	автомобиль
человек	<b>90,48</b>	9,52	0,00
группа людей	17,86	<b>71,43</b>	10,71
автомобиль	0,00	12,31	<b>87,69</b>

Таблица 2. Надежность классификации движущихся объектов по оценке периодичности

Тип объекта	Эталоны		
	человек	группа людей	автомобиль
человек	<b>90,48</b>	9,52	0,00
группа людей	12,5	<b>82,14</b>	5,36
автомобиль	0,00	13,85	<b>86,15</b>

Таблица 3. Надежность классификации движущихся объектов по спектральному описанию и оценке периодичности

В [2] приведены характеристики ряда периметровых охранных систем (IREMBASS DT-562A, MA 2772 CLASSIC), которые позволяют обнаруживать и классифицировать движущиеся объекты. Вероятность правильной классификации составляет не более 0,8–0,85. В обзорах подобного рода оборудования [6] сообщается, что достоверность классификации движущихся объектов (человек, группа людей, колесная техника) периметровой системой охраны ЭМЗУ Рубеж-М превышает 0,8. Производители периметровых систем охраны не публикуют данных о надежности классификации. Это связано с необходимостью адаптации систем к различным природно-климатическим условиям. Сравнительный анализ оценок классификации существующих интеллектуальных периметровых систем пассивной локации и полученные результаты тестирования алгоритма выделения информативных признаков сейсмических сигналов позволяют сделать вывод о целесообразности его использования для классификации движущихся объектов.

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований амплитудно-временных и амплитудно-частотных характеристик сигналов, разработанных алгоритмов обнаружения и распознавания движущихся объектов были определены основные этапы обработки сигналов [7]: обнаружение полезных фрагментов сигнала; выделение информативных признаков обнаруженных полезных фрагментов сигнала; сравнение с эталоном; принятие решения.

Наряду с традиционно используемыми спектральными параметрами набор информативных признаков включает характеристики периодичности. Классификация анализируемых типов движущихся объектов (человек, группа людей, автомобильная техника) на основе совместного анализа спектров и оценки периодичности повышает надежность распознавания.

В процессе выполнения работы было установлено, что реализация алгоритмов обнаружения и классификации движущихся объектов по сигналам сейсмических сенсоров пассивной локации должна основываться на достаточном объеме статистических данных, полученных в результате испытаний системы сенсорных средств на охраняемом объекте в разное время года, при различных погодных условиях.

Дальнейшие исследования включают сбор и анализ сигналов при движении объектов по разным видам грунта в разные сезоны года, уточнение способов (алгоритмов) выделения информативных признаков полезных сигналов, применение алгоритмов кластеризации для создания эталонов анализируемых классов движущихся объектов, выбор критерия принятия решения с учетом информативности каждого из признаков.

Основные результаты получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы «Разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки информации для решения многопараметрической задачи идентификации воздействия по классам» программы Союзного государства «Функциональная СВЧ электроника-2» (№20071866).

### Литература

1. Звездинский С.С. Периметровые маскируемые сейсмические средства обнаружения // Специальная техника. – 2004. – № 2. – С. 20–28; – № 3. – С. 26–37.
2. Звездинский С.С. Быстроразвертываемые средства обнаружения и системы охранной сигнализации // Специальная техника. – 2003. – № 5. – С. 11–23.
3. Звездинский С.С., Иванов В.А. Повышение информативности пассивных периметровых средств обнаружения // Современные технологии безопасности. – 2005. – № 1. – С. 9–18.
4. Введенский Б.С. Оборудование для охраны периметров. – М.: Мир безопасности, 2002. – 112 с.
5. Козлов Э.В., Левковская Т.В. Двухступенчатый алгоритм обнаружения движущихся объектов по сигналам сенсорных модулей // Сборник трудов VI конференции молодых ученых. Вып. 6. Информационные технологии. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 3–8.
6. Козинный А., Косарев А., Матвеев В. Нарушителя выдаст колебание грунта // БДИ. – 2006. – № 4. – С. 74–77.

7. Левковская Т.В., Козлов Э.В. Обработка сейсмических сигналов в интеллектуальных системах пассивной локации // Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники: Материалы X международной научно-технической конференции. – Таганрог – Москва – Донецк, 2009. – С. 93–96.

- Козлов Эдуард Викторович** – Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики, младший научный сотрудник, kozloveduard@mail.by
- Левковская Татьяна Вячеславовна** – Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики, старший научный сотрудник, tanya@newman.bas-net.by