

НУДК 004.931

Т.В. Левковская, Э.В. Козлов, Н.И. Мурашко

ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

Рассматриваются основные этапы обработки сейсмических сигналов в интеллектуальных системах пассивной локации. Описываются разработанные алгоритмы обнаружения и классификации движущихся объектов (человека, группы людей, автомобильной техники). Результаты тестирования экспериментальной системы обработки сейсмических сигналов позволяют сделать заключение о целесообразности использования разработанных алгоритмов в интеллектуальных системах охраны объектов и территорий.

Введение

В настоящее время при организации охраны территории широко применяются сейсмические системы пассивной локации, которые наиболее удобны для блокирования участков протяженных периметров объектов на пересеченной местности [1–4]. Интеллектуальные системы пассивной локации предназначены для раннего обнаружения вторжения нарушителя на охраняемый объект, идентификации типа нарушителя, а также точного определения его местоположения. К основным достоинствам сейсмических сенсоров относятся отсутствие собственного излучения и возможность полного их заглубления вместе с соединительными проводами в грунт, что снижает вероятность преодоления охраняемой территории даже при осведомленности нарушителя о принципах работы системы. Одним из существенных недостатков сейсмических систем пассивной локации является низкая помехоустойчивость при потенциально высокой вероятности обнаружения (не менее 0,9) в условиях воздействия разнообразных сейсмических помех природно-климатического и техногенного характера [2, 3].

Задача обнаружения и классификации движущихся объектов в системах пассивной локации решается путем анализа сигналов, фиксируемых сенсорами при движении человека, группы людей, автомобиля в зоне наблюдения. Характеристики сигналов определяются условиями возбуждения колебаний, фильтрующими свойствами физических сред (упругостью, поглощением грунта) и характеристиками приемной аппаратуры. Так, например, при промерзании приповерхностного слоя грунта уровень сейсмических сигналов уменьшается. Спектр сигнала зависит от вида грунта (песок, глина, гравий) и его состояния (влажный, сухой, рыхлый), анизотропии (наличие неоднородностей, например канав), состояния подстилающей поверхности (трава, снег, гладкая/неровная) и других факторов. Также необходимо учитывать наличие естественных микросейсмов, обусловленных близкорасположенными строительными механизмами, корнями крупных деревьев, заграждениями и неустойчивыми строительными конструкциями при сильном ветре. Таким образом, «полезный» сигнал от нарушителя возникает в условиях многочисленных помеховых факторов [3]. При этом диапазоны основных характеристик полезных сигналов и помех, как правило, перекрываются.

Целью исследований является разработка методов и алгоритмов обнаружения и классификации движущихся объектов, предназначенных для использования в интеллектуальных системах пассивной локации и функционирующих в условиях реальной фоновой обстановки. Кроме того, обнаружение движущихся объектов должно выполняться в квазиреальном масштабе времени.

1. Двухступенчатый алгоритм обнаружения движущихся объектов по сигналам сейсмических сенсорных модулей

Обнаружение движущихся объектов базируется на выявлении отличий полезных сигналов и окружающего (помехового) фона. В большинстве детекторов полезного сигнала выполняется анализ изменения во времени энергетических параметров (энергии сигнала, спектра,

кепстра). Анализируемый сигнал разбивается на кадры (окна анализа), которые, как правило, перекрываются. Для каждого кадра рассчитывается классификационный параметр, в качестве которого чаще всего используются усредненные на заданном временном интервале значения энергетических параметров, их разница (дельта-параметры), дисперсия или среднеквадратичное отклонение. Сигнал текущего окна анализа считается полезным, если значение классификационного параметра больше заданного порогового значения. Пороговое значение определяется характеристиками окружающего шума и рассчитывается на интервалах отсутствия полезного сигнала.

В современных детекторах для улучшения их характеристик часто применяются двухступенчатые алгоритмы, в которых используются порог по значению классификационного параметра $Thr(d)$ при определении начала и конца полезного фрагмента сигнала и порог по длительности $Thr(n)$, устанавливающий интервалы подтверждения правильности срабатывания детектора. В общем случае пороги срабатывания детектора полезного сигнала при определении начальной и конечной границ могут принимать разные значения.

Алгоритмы обнаружения полезных сигналов в общем случае схожи, но они подлежат корректировке в зависимости от возможностей конкретной системы и физических условий ее эксплуатации. Разработанный двухступенчатый алгоритм обнаружения движущихся объектов по сигналам сейсмических сенсорных модулей функционирует следующим образом [5]. Сигналы, оцифрованные с частотой дискретизации 1250 Гц, 16 бит на отсчет, анализируются кадрами длительностью 256 отсчетов (0,2 с) со сдвигом окна анализа на $\frac{1}{4}$ (0,05 с). Для каждого кадра анализа рассчитываются энергетические (амплитудные) параметры: энергия сигнала в n -м окне анализа $E(n)$ и среднеквадратичное отклонение для заданного временного интервала $D(n)$, которое является классификационным параметром детектирования полезных сигналов. Принятие решения о начале полезного фрагмента сигнала осуществляется в два этапа. На первом этапе фиксируется момент времени n , для которого значение классификационного параметра $D(n)$ больше заданного порогового значения $Thr(d)$. На втором этапе анализируется интервал времени, в течение которого выполняется условие $D(n) \geq Thr(d)$. Окончательное решение о начале сегмента полезного сигнала принимается, если $D(n) \geq Thr(d)$ на интервале времени, равном $Thr(n)$ кадрам анализа. Аналогичным образом принимается решение о конце участка полезного сигнала, т. е. условие $D(n) < Thr(d)$ должно выполняться на интервале времени, равном $Thr(n)$ кадрам. На рис. 1 и 2 вертикальные маркеры соответствуют начальной и конечной границам обнаруженных полезных фрагментов сигналов, записанных при движении человека и автомобиля в зоне обнаружения сенсора.

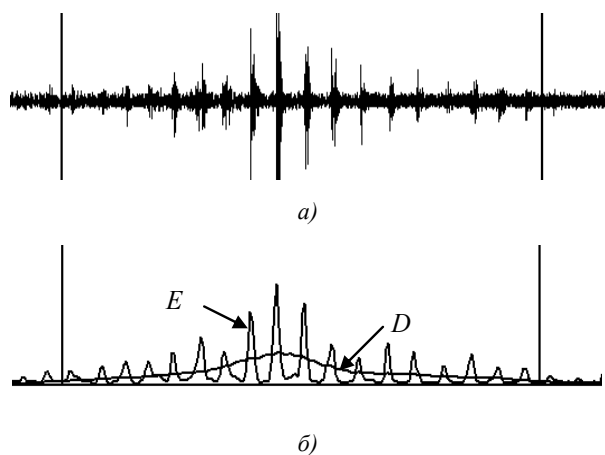


Рис. 1. Результат работы алгоритма детектирования полезного сигнала от человека: а) осциллограмма сигнала; б) энергия сигнала, среднеквадратичное отклонение

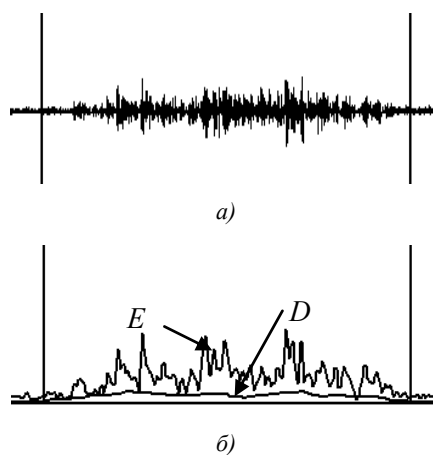


Рис. 2. Результат работы алгоритма детектирования полезного сигнала от автомобиля: а) осциллограмма сигнала; б) энергия сигнала, среднеквадратичное отклонение

В результате проведенных исследований были определены следующие значения: временной интервал усреднения мгновенных значений энергии сигнала и расчета среднеквадратичного отклонения $K = 16$, порог по длительности $Thr(n) = 8$. Таким образом, алгоритм работает с задержкой по времени $(Thr(n) + K) * \Delta N = (8 + 16) * 0,05 = 1,2$ с, где ΔN – длительность сдвига окна анализа сигнала. Пороговые значения алгоритма обнаружения были выбраны экспериментально таким образом, чтобы минимизировать расхождения в определении начальных и конечных границ полезных фрагментов при анализе исходных и очищенных от шума сигналов.

Результаты работы алгоритма при использовании спектральной энергии для расчета классификационного параметра аналогичны результатам, полученным при использовании мгновенных значений энергии сигнала, но при этом время выполнения алгоритма увеличивается. Вместе с тем временной фактор является существенным при функционировании алгоритма в реальном (квазиреальном) масштабе времени.

Лабораторные исследования разработанного алгоритма показали его работоспособность при анализе сейсмических сигналов, полученных в условиях реальной фоновой обстановки. Алгоритм позволяет определить местоположение полезных фрагментов в квазиреальном масштабе времени.

2. Классификация движущихся объектов

Классификация движущихся объектов осуществляется путем сравнения параметрического описания обнаруженных фрагментов полезного сигнала с эталонными информативными признаками. Сравнительный анализ сейсмических сигналов, обусловленных воздействием на грунт разных типов движущихся объектов, позволяет выявить амплитудно-временные и частотные закономерности.

При отсутствии движущегося объекта на выходе сейсмического сенсора присутствуют случайные сигналы (сейсмические шумы), которые накладываются на квазипериодические импульсные сигналы, возникающие при движении человека (см. рис. 1). 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 (см. рис. 2). 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. Спектральные составляющие свыше 200–300 Гц практически малозаметны на фоне естественных микросейсм, 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. Одним из способов формирования информативного и компактного признакового пространства динамических образов является определение интегральных характеристик, рассчитанных для всего полезного фрагмента сигнала.

Оценка периодичности и значения периода на интервале обнаруженного полезного фрагмента сигнала выполняется с использованием корреляционных методов анализа [6] путем расчета и анализа кратковременных автокорреляционной функции (АКФ) или функции среднего модуля разности. Использование последней обеспечивает снижение вычислительных и вре-

менных 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 частоте дискретизации 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 два раза (2048 отсчетов), что ведет к значительным вычислительным и временным затратам по обработке сигналов. Объем вычислений существенно сократится при расчете автокорреляционных функций по энергии сигнала для заданного интервала времени. График изменений покadroвых значений энергии сигнала от человека (см. рис. 1, 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 ($32 * 64 = 2048$ 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 выбираются медианные значения. Оценка периода сигнала, позволяющая определить скорость передвижения объектов в зоне обнаружения сейсмоприемников, на данном этапе исследований не анализировалась. Возможные сбои в определении значений периода могут быть скорректированы путем анализа гистограммы значений периодов на выделенном фрагменте и определения моды с учетом кратности значений периодов.

Анализ спектрограмм полезных сейсмических сигналов от человека показал, что мгновенные ДПФ-спектры в моменты времени между импульсами по форме схожи со спектром окружающего фона. Поэтому 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 отрезках (кадрах) сигнала, соответствующих энергетическим всплескам, уменьшая при этом вклад мгновенных спектров на интервалах между импульсами.

ДПФ-спектры (рис. 3) получены для полезных фрагментов сейсмических сигналов, зарегистрированных при движении человека и легкового автомобиля в зоне обнаружения сенсора. Сигналы оцифровывались с частотой дискретизации 1250 Гц, 16 бит на отсчет и анализировались кадрами длительностью 256 отсчетов (0,2 с) со сдвигом окна анализа на 1/4 (64 отсчета), т. е. таким же образом, как и при обнаружении полезного сигнала.

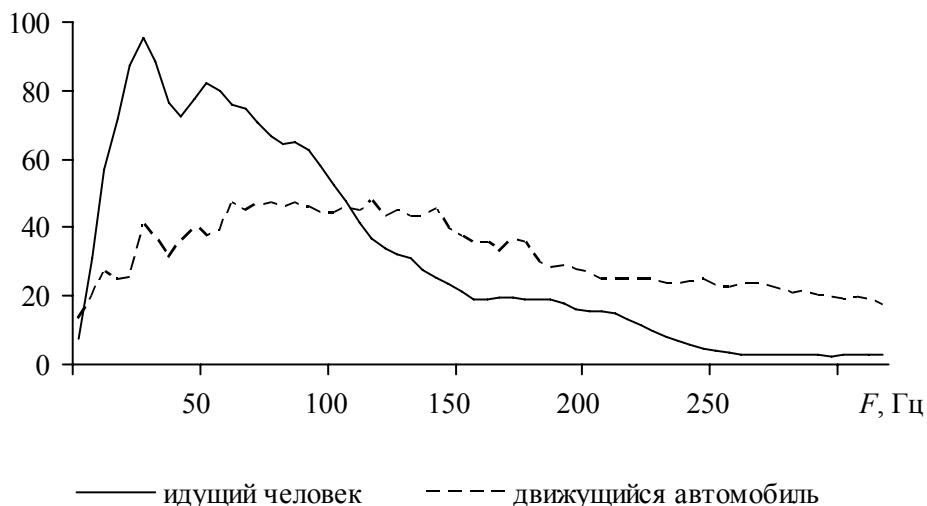


Рис. 3. Нормированные и усредненные путем взвешивания ДПФ-спектры сейсмических сигналов, зафиксированных при движении человека и автомобиля

Полученное таким образом спектральное описание в меньшей степени зависит от уровня окружающего фона (естественных микросейсм). 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.

Решение о соответствии анализируемых векторов параметров одному из заданных эталонных классов объектов принимается на основании частных решений, полученных по спектральному описанию и оценке периодичности. В качестве решения выбирается класс объекта, количественная оценка соответствия с которым (достоверность классификации) максимальна.

3. Результаты экспериментальных исследований надежности классификации движущихся объектов

Комплекс разработанных алгоритмов обнаружения и классификации движущихся объектов по сигналам сейсмических сенсорных модулей реализован в виде динамически подключаемой библиотеки экспериментального программного обеспечения ввода, обработки и визуализации сигналов сенсорных модулей. Входными данными являются файлы сейсмических сигналов, выходными – результаты обработки сигналов с указанием границ обнаруженных полезных фрагментов сигналов и оценок достоверности классификации обнаруженных объектов по отношению к эталонным классам движущихся объектов.

Оценка надежности классификации движущихся объектов была выполнена путем анализа сейсмических сигналов, зафиксированных сенсорными модулями при движении в зоне обнаружения сенсоров следующих классов объектов: «человек», «группа людей» (три-пять человек), «автомобиль». В качестве приемников сигналов были использованы разработанные в НИИ прикладных физических проблем им. А. Севченко БГУ сейсмические сенсорные модули, чувствительный элемент которых – классический точечный преобразователь геофон [1, 4]. Сейсмические сенсоры, соединенные электрическим кабелем, были проложены в два ряда на расстоянии 10 м друг от друга и заглублены в грунт на 0,3–0,5 м. Блок приема сигналов находился в помещении. Сигналы оцифровывались с частотой дискретизации 1250 Гц, 16 бит на отсчет и сохранялись в файлах в двоичном формате.

Записанные сигналы анализировались с помощью разработанного экспериментального программного обеспечения. В результате обработки сейсмических сигналов были обнаружены 184 полезных фрагмента, из них 63 при движении объектов класса «человек», 56 – «группа людей», 65 – «автомобиль». Для каждого полезного фрагмента сигнала рассчитывался вектор информативных признаков, включающий нормированный и усредненный путем взвешивания ДПФ-спектр и количественную оценку периодичности. Эталоны анализируемых классов объектов были рассчитаны путем усреднения информативных признаков для 1/3 реализаций. Оценки надежности классификации (отношение правильно распознанных полезных фрагментов сигналов к общему количеству обнаруженных фрагментов, выраженное в процентах) по спектральному описанию, оценке периодичности, обоим типам информативных признаков были рассчитаны для оставшейся части обнаруженных полезных фрагментов сигналов (таблица). Следует отметить, что результаты получены для сигналов, зафиксированных при движении одних и тех же объектов в одинаковых климатических условиях.

Надежность классификации движущихся объектов, %

Информативные признаки	Класс объекта		
	человек	группа людей	автомобиль
Спектральное описание	80,95	71,43	75,38
Оценка периодичности	90,48	73,21	87,69
Спектральное описание и оценка периодичности	90,48	82,14	86,15

Представленные на рис. 4 распределения демонстрируют достаточно хорошее разделение движущихся объектов «человек» и «автомобиль». Объекты класса «группа людей» занимают промежуточное положение. Дальнейшие исследования, связанные с улучшением характеристик классификаторов, включают:

– уточнение способов (алгоритмов) определения информативных признаков полезных сигналов;

- применение алгоритмов кластеризации для создания эталонов анализируемых классов движущихся объектов;
- уточнение критерия принятия решения с учетом информативности каждого из признаков.

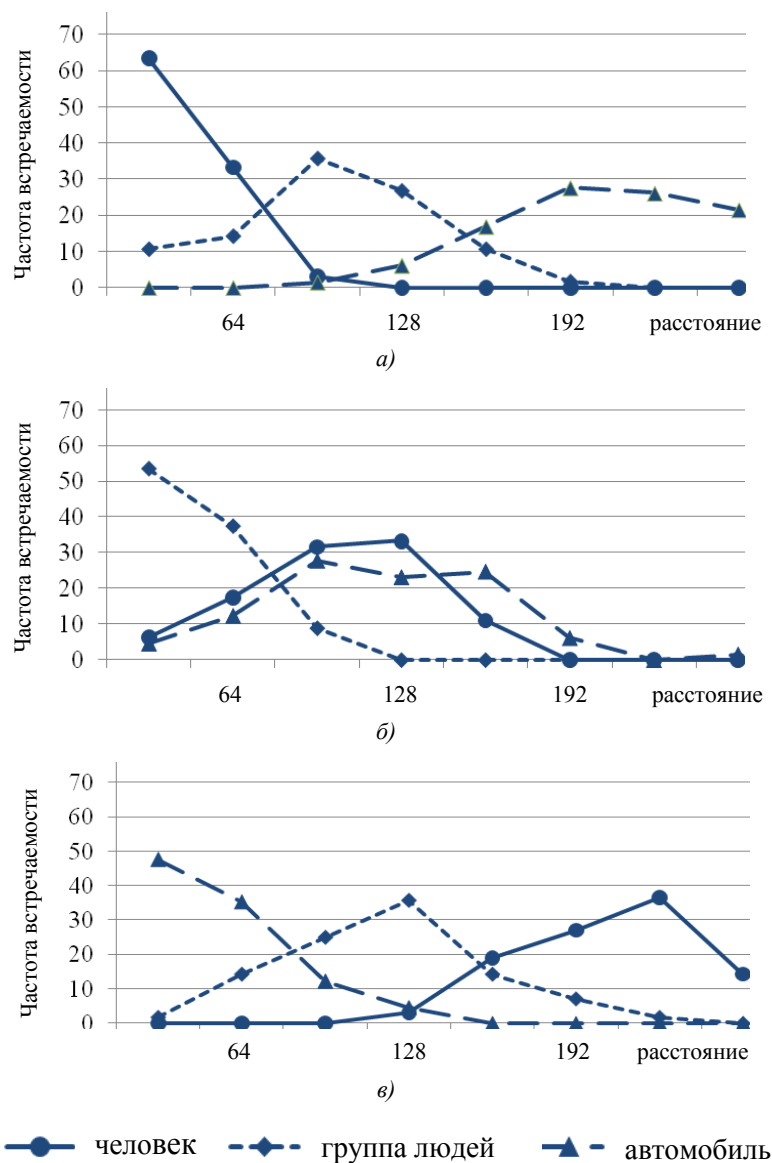


Рис. 4. Нормированные распределения расстояний между реализациями движущихся объектов и эталонами: а) «человек»; б) «группа людей»; в) «автомобиль»

В работе [2] приведены характеристики ряда периметровых охранных систем (IREMBASS DT-562A, MA 2772 CLASSIC), которые позволяют обнаруживать и классифицировать движущиеся объекты. Однако сведения о достоверности классификации движущихся объектов этими системами не приводятся. Отмечается также, что вероятность правильной классификации составляет не более 0,8–0,85. На сайте компании «Полисет» (<http://polyset.ru>) сообщается, что достоверность классификации движущихся объектов периметровой системой охраны ЭМЗУ Рубеж-М превышает 0,8.

Отсутствие на сайтах разработчиков и поставщиков интеллектуальных средств охраны протяженных объектов информации о гарантированной достоверности (надежности) обнаружения и классификации движущихся объектов, по всей видимости, связано с необходимостью адаптации систем к различным природно-климатическим условиям их применения с учетом сезонных настроек.

Сравнительный анализ оценок классификации существующих интеллектуальных периметровых систем пассивной локации позволяет сделать заключение: полученные результаты соответствуют современному уровню с учетом того, что классификация распознаваемых типов объектов («человек», «группа людей», «автомобильная техника») производилась в статическом режиме, т. е. по сигналам сенсорных модулей, предварительно записанным в файл.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований амплитудно-временных и амплитудно-частотных характеристик сигналов, а также 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.

Разработанный двухступенчатый алгоритм обнаружения движущихся объектов позволяет определить местоположение полезных фрагментов сигналов в условиях реальной фоновой обстановки и функционирует в квазиреальном масштабе времени. Наряду с традиционно используемыми спектральными параметрами [8, 9] 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. Результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов обнаружения и классификации движущихся объектов по сигналам сейсмических сенсоров пассивной локации позволяют сделать заключение о целесообразности их использования в интеллектуальных системах охраны объектов и территорий.

Направления дальнейших исследований по созданию интеллектуальных систем пассивной локации связаны с решением следующих задач:

- сбора и анализа сигналов при движении объектов по разным видам грунта в разные сезоны года;
- совместного анализа сигналов, полученных от сенсорных модулей, с учетом их размещения;
- разработки процедур (методик) адаптации разработанных алгоритмов к реальным условиям эксплуатации систем пассивной локации с учетом метеорологических, физико-географических, техногенных и многих других факторов;
- априорного описания классов полезных сигналов и потенциальных помех (формирования обобщенных образов).

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).

Список литературы

1. Звежинский, С.С. Периметровые маскируемые сейсмические средства обнаружения / С.С. Звежинский // *Специальная техника*. – 2004. – № 3. – С. 26–37.
2. Звежинский, С.С. Быстроразвертываемые средства обнаружения и системы охранной сигнализации / С.С. Звежинский // *Специальная техника*. – 2003. – № 5. – С. 11–23.
3. Звежинский, С.С. Повышение информативности пассивных периметровых средств обнаружения / С.С. Звежинский, В.А. Иванов // *Современные технологии безопасности*. – 2005. – № 1. – С. 9–18.
4. Введенский, Б.С. Оборудование для охраны периметров / Б.С. Введенский. – М. : Мир безопасности, 2002. – 112 с.
5. Козлов, Э.В. Двухступенчатый алгоритм обнаружения движущихся объектов по сигналам сенсорных модулей / Э.В. Козлов, Т.В. Левковская // *Сб. тр. VI конф. молодых ученых. Вып. 6. Информационные технологии*. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 3–8.

6. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд; пер. с англ. под ред. Ю.Н. Александра. – М. : Мир, 1978. – 848 с.

7. Левковская, Т.В. Обработка сейсмических сигналов в интеллектуальных системах пассивной локации / Т.В. Левковская, Э.В. Козлов // Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники : материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 93–96.

8. Buried line sensor evaluation for BISS / R. L. Allen [et al.] // Proc. Carnahan Conf. on crime countermeasures. – Lexington : Univ. of Kentucky, 1974. – P. 9–21.

9. Муравьев, В.Н. Экспериментальные оценки частотно-временных характеристик сейсмических сигналов и помех для разработки систем охранной сигнализации / В.Н. Муравьев // Современные проблемы фундаментальных прикладных наук – аэрофизика и космические исследования : сб. тр. 49-й науч. конф. МФТИ. – М. : МФТИ, 2006. – Т. 3. – С. 89–92.

Поступила 09.02.10

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: tanya@newman.bas-net.by,
mni@newman.bas-net.by*

T.V. Levkovskaya, E.V. Kozlov, N.I. Murashko

PROCESSING SEISMIC SIGNALS IN THE PASSIVE INTELLIGENT LOCATION SYSTEMS

The basic stages of seismic signal processing in the passive intelligent location systems are discussed in the paper. The developed detection and classification algorithms of moving objects such as a human, a group of humans, a car, etc. are described. Testing results for an experimental seismic signal processing system allow drawing the conclusion about the reasonability of using the developed algorithms in an intelligent objects security systems.