

УДК 621.391.2 : 519.24

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕШЕХОДА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

С. А. Алямкин, С. И. Еременко

ООО «Унискан»,
630117, г. Новосибирск, ул. Арбузова, 4/26
E-mail: alyamkin@uniscan.biz

Предложен алгоритм распознавания пешехода на основе анализа автокорреляционной функции сейсмического сигнала. Показана эффективность данного метода в терминах вероятностей правильного распознавания и ложной тревоги. Рассмотрены методы, позволяющие уменьшить трудоёмкость предложенного алгоритма. Проведено сравнительное исследование влияния частоты отбора точек и метода расчёта функции автокорреляции на эффективность работы и трудоёмкость алгоритма распознавания пешехода.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, распознавание пешехода, автокорреляционная функция, трудоёмкость алгоритма.

Введение. Разработка алгоритмов распознавания для сейсмической системы обнаружения (ССО) является актуальной задачей в силу ряда причин: она входит в состав разведывательно-сигнализационных комплексов, применяемых для охраны государственной границы, арсеналов оружия, АЭС, нефте- и газопроводов. По сравнению с системами, базирующимися на других принципах работы, данная система обладает рядом преимуществ, таких как скрытность установки и пассивность функционирования [1]. Действие сейсмических систем основано на использовании размещаемых в грунте датчиков [2], работа которых обусловлена алгоритмической селективностью, опирающейся на различия характеристик шумовых и целевых сигналов. Важными характеристиками сейсмических датчиков являются: вероятность обнаружения и распознавания объекта, время наработки на ложную тревогу (ЛТ) [3], время автономной работы (АР). Последнее в значительной степени определяется экономичностью алгоритма в смысле затрат энергии на вычисления (трудоёмкость алгоритма).

Для решения задачи распознавания необходимо в автоматическом режиме извлекать из анализируемого сигнала параметры, на основе которых при сравнении с пороговыми значениями система принимает решение выдавать или нет сигнал тревоги. В качестве параметров используются: статистика сигнала [4], спектральная статистика, коэффициенты вейвлет-разложения сигнала [5], статистика распределения импульсов сигнала (превысивших энергетический порог) [1, 6–8], коэффициенты регрессионной модели сигнала [1]. Для анализа извлечённых параметров сейсмических сигналов и построения алгоритма классификации применяются: нейросетевой подход [1, 5], пороговый детектор [3, 4–8], метод k -ближайших соседей [8]. В [1, 3–7] рассматривается эффективность работы алгоритмов в терминах вероятностей распознавания и ложной тревоги, но не уделяется должного внимания экономичности алгоритма, необходимой для датчиков с автономным питанием.

Характерное время автономной работы (до замены элементов питания) сейсмических датчиков зарубежных ССО составляет: REMBASS-2 (США) — 30 дней, CLASSIC 2000 (Франция) — 50 дней. Для более эффективного применения ССО требуется увеличение времени автономной работы датчика, что делает необходимым использование более экономичных алгоритмов обработки сейсмического сигнала без уменьшения при этом его

сигнализационной надёжности: вероятность обнаружения и распознавания пешехода P_{Π} не менее 90 %, время наработки на ложную тревогу $T_{ЛТ}$ не менее 100 ч. Тактика применения ССО, например, пограничными войсками требует не менее 1 года автономной работы $t_{АР}$.

Целью предлагаемой работы является создание одновременно достаточно эффективного ($P_{\Pi} > 90$ %, $T_{ЛТ} > 100$ ч) и экономичного ($t_{АР} > 1$ года) алгоритма распознавания пешехода на основе анализа сейсмического сигнала.

Алгоритм распознавания. Базой для разработки алгоритма распознавания явилась собранная ранее библиотека сейсмических записей. В качестве целевых сигналов использовались 100 записей прохода человека, произведённых на 50 различных полигонах, а в качестве фоновых были взяты 220 разнообразных сейсмических записей, не содержащих целевого сигнала, — естественный сейсмический фон местности, техника, шум турбин и т. д. — общей длительностью более 50 тыс. ч.

На рис. 1, *a*, *b* приведены исходные сейсмограммы пешехода на разных грунтах (входной сигнал оцифрован 12-разрядным АЦП с частотой 512 Гц). Видно, что, хотя характер порождаемых шагами импульсов сильно различается для разных полигонов, неизменным остаётся ритмический рисунок интенсивности сигнала. Исходя из этого для выделения из сейсмического сигнала периодической составляющей была выбрана автокорреляционная функция.

Входной сигнал был оцифрован 12-разрядным АЦП с частотой 512 Гц (рис. 2, *a*). Обработка входного сигнала состояла из цифровой фильтрации, выпрямления (рис. 2, *b*) и подсчёта автокорреляционной функции (рис. 2, *c*). Длительность вычисляемой функции автокорреляции выбрали равной 3 с для того, чтобы в ней умещалось минимум два импульса от шагов пешехода.

При сравнении автокорреляционных функций целевого и фоновых сигналов на рис. 2, *c* видно, что они сильно разнятся, хотя фоновый сигнал в данном случае имел выраженный импульсный характер. При совместном просмотре автокорреляционных функций фоно-

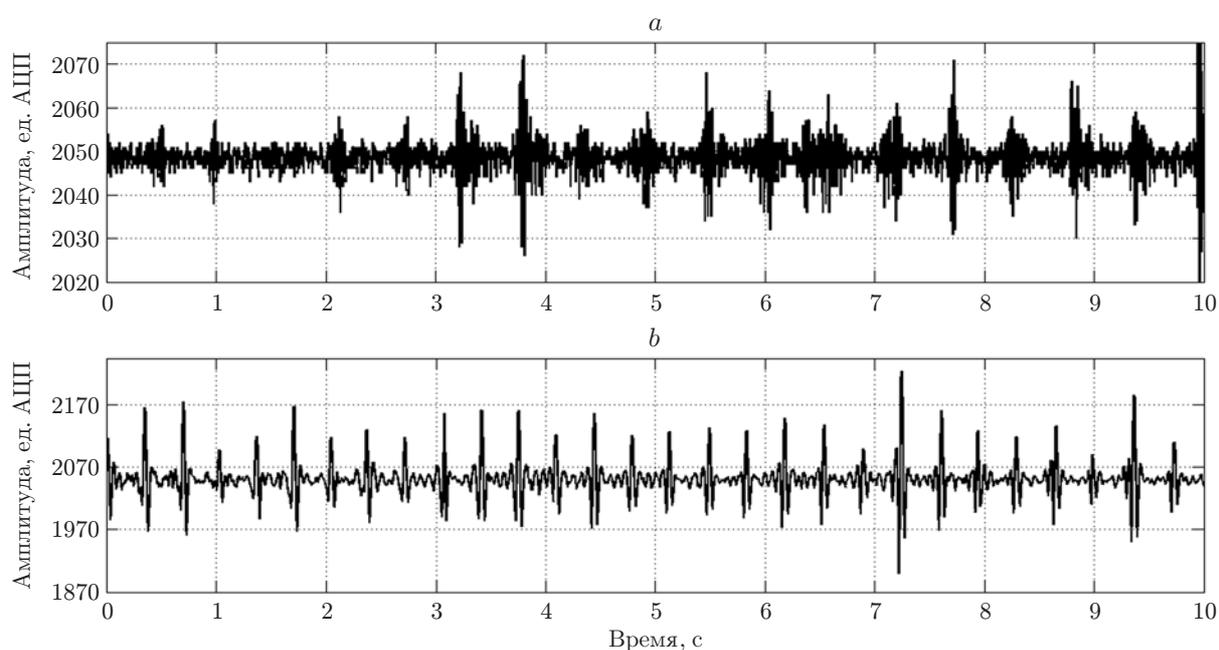


Рис. 1. Типичные сейсмограммы пешехода: *a* — полигон № 1, *b* — полигон № 7

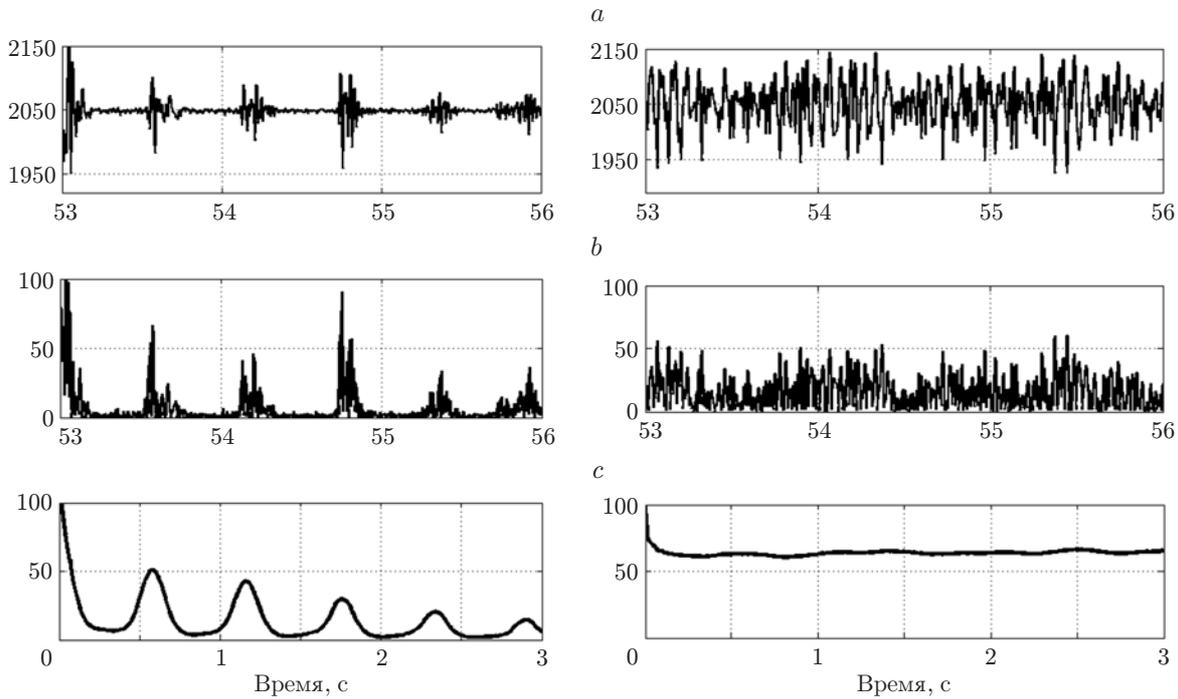


Рис. 2. Сравнение сейсмограмм пешехода (слева) и шума деревьев на ветру (справа): *a* — исходная сейсмограмма, *b* — выпрямленный сейсмический сигнал, *c* — сглаженная функция автокорреляции (константа времени сглаживания 0,2 с)

вых и целевых сигналов в качестве классификационных были выбраны корреляционный контраст (КК):

$$\text{КК} = (A_1 + A_2), \quad (1)$$

где A_1 , A_2 — амплитуды первых двух максимумов нормированной автокорреляционной функции, и частота f :

$$f = 2/\tau, \quad (2)$$

где τ — интервал времени между нулевым и вторым максимумами функции автокорреляции.

Далее сигналы из библиотеки сейсмических записей были подвергнуты автоматической обработке, заключающейся в расчёте автокорреляционной функции и извлечении параметров (КК, f) с периодом в 1 с. На рис. 3 представлены фоновые (треугольники) и целевые сигналы (круги) на плоскости в пространстве данных параметров. В пространстве двух выбранных параметров происходит разделение множеств целевого и фонового сигналов (имеются непересекающиеся области). На рисунке также видно, что в зависимости от выбора порогового значения КК в диапазоне 10–30 получаются разные вероятности распознавания пешехода, вероятности ложной тревоги (на данном множестве сигналов).

Для того чтобы оценить эффективность алгоритма распознавания пешехода на основе анализа параметров функции автокорреляции (КК, f) зафиксируем значение времени наработки на ложную тревогу: $T_{\text{ЛТ}} = 100$ ч. С учётом того что анализ функции автокорреляции производится 1 раз в секунду, вероятность ложного срабатывания не должна превышать

$$P_{\text{ЛТ}} = 1/T_{\text{ЛТ}} = 2,8 \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

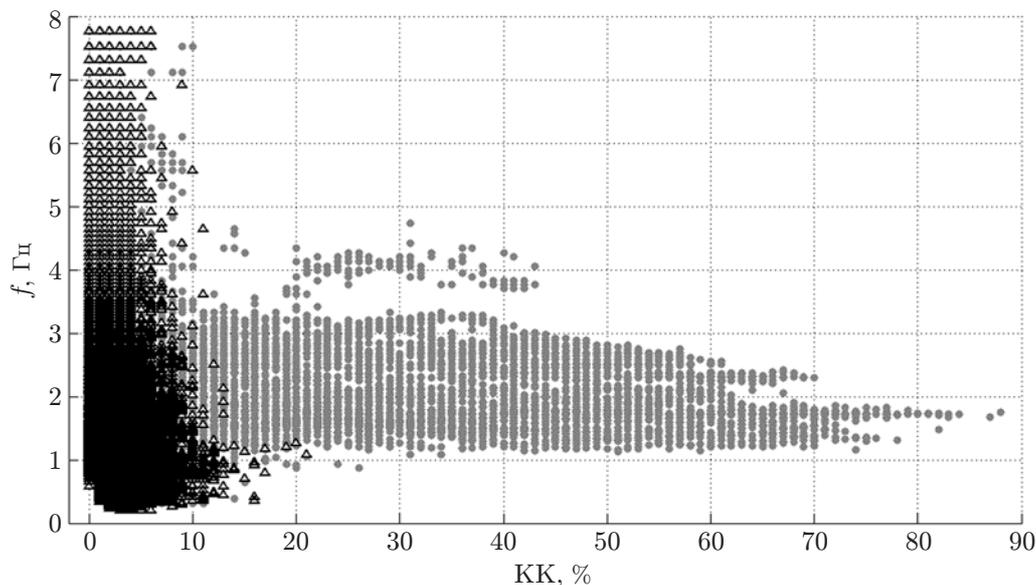


Рис. 3. Множества точек в пространстве двух параметров (КК, f), соответствующие целевым сигналам (пешеход) и фоновым сигналам (фон местности, техника, шум леса и др.)

Частота шагов человека при движении ограничена диапазоном $[0,5, 5,0]$ Гц, соответственно $0,5 < f < 5,0$; если частота будет находиться вне указанного интервала, считаем, что это фоновый сигнал.

В пространстве двух параметров

$$P_{\text{ЛТ}} = P_1 P_2, \quad (4)$$

где P_1 — вероятность того, что $0,5 < f < 5,0$; P_2 — вероятность того, что КК меньше выбранного порога $G_{\text{КК}}$.

Построим обратную функцию распределения по значениям частоты f для фоновых сигналов (рис. 4, а). На графике видно, что $P_1 \approx 0,9$, следовательно, использование информации о частоте сейсмического сигнала будет незначительно влиять на вероятности правильного распознавания и ложной тревоги. Далее, для упрощения процедуры сравнения алгоритмов принимаем $P_1 \approx 1,0$.

Вычислим обратную функцию распределения по значениям корреляционного контраста для фонового сигнала (рис. 4, б). Видно, что в логарифмическом масштабе по оси ординат происходит спрямление обратной функции распределения по КК. Используя метод наименьших квадратов, получаем уравнение прямой $y = kx + b$, где $k = -0,5$, $b = 0$. С учётом линейной зависимости рассчитаем пороговое значение $G_{\text{КК}}$, при котором вероятность ложной тревоги будет равна $2,8 \cdot 10^{-6}$:

$$G_{\text{КК}} = \frac{\ln(2,8 \cdot 10^{-6})}{0,5} = 25,6. \quad (5)$$

На рис. 5 показаны сейсмограмма и изменение КК при приближении пешехода к датчику с большого расстояния. Зададим пороговое значение $G_{\text{КК}} = 25,6$ %. При превышении этого значения считаем, что пешеход распознан. Из графика видно, что порог превышен начиная с 75-й секунды. Такую же операцию тестирования проведём для других сигналов

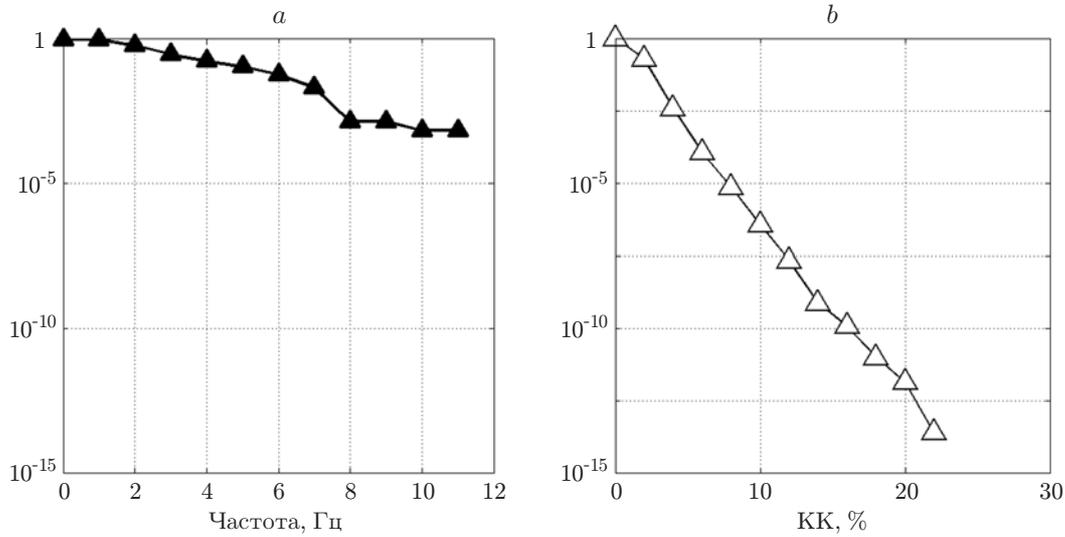


Рис. 4. Обратные функции распределения фоновых сигналов: *a* — по частоте, *b* — по корреляционному контрасту

пешехода (всего 100 записей сейсмического сигнала). Считаем, что пешеход распознан, если хоть раз превышен порог $G_{\text{КК}}$, и не распознан, если порог не был превышен ни разу.

При частоте отбора значений выпрямленного сигнала для корреляции 512 Гц получаем вероятность распознавания пешехода $P_{\text{п}} = 98\%$ при времени наработки на ложную тревогу $T_{\text{ЛТ}} = 100$ ч, что показывает достаточно большую эффективность алгоритма распознавания пешехода.

Трудоёмкость алгоритма. Потребление энергии микроконтроллером датчика зависит от числа операций в секунду, производимых микропроцессором. Расчёт и анализ параметров функции автокорреляции производится 1 раз в секунду, поэтому его вклад

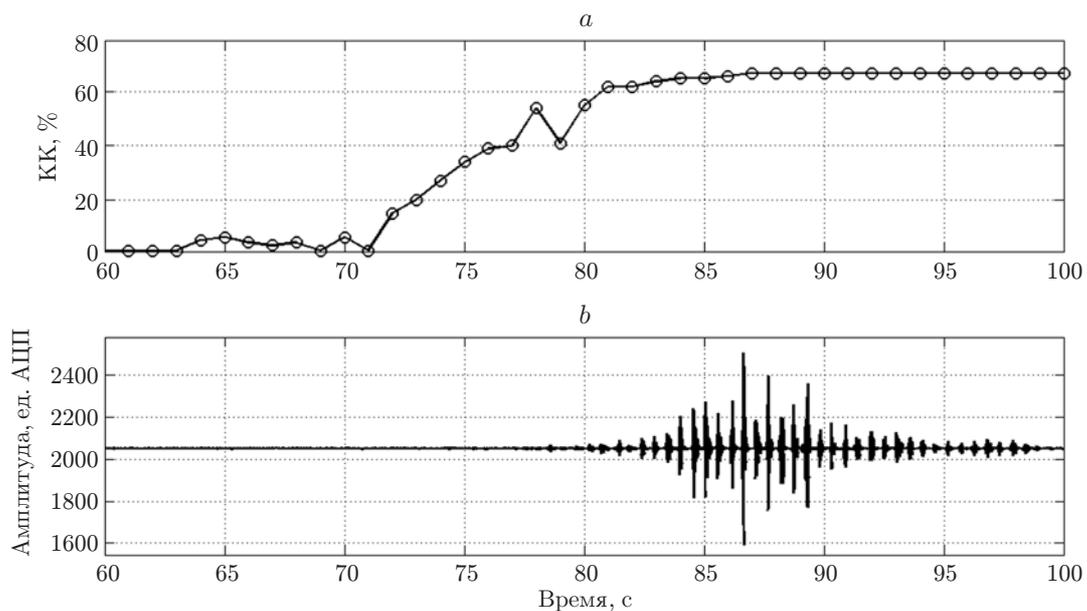


Рис. 5. Изменение корреляционного контраста при движении пешехода: *a* — зависимость корреляционного контраста от времени, *b* — исходный сейсмический сигнал

Частота отбора, Гц	Вероятность распознавания	
	автокорреляция	клипированная автокорреляция
512	98	98
128	98	97
32	95	93
8	28	22

в потребление невелик и основные вычислительные ресурсы тратятся на расчёт самой функции автокорреляции:

$$\Phi(n) = \sum_{k=1}^N S(k)S(k-n). \quad (6)$$

Потребление энергии пропорционально частоте отбора значений выпрямленного сигнала F_S , и каждое новое его значение для подсчёта функции автокорреляции длины n требует n умножений (6), т. е. $F_S n$ операций умножения в секунду. Длина массива автокорреляции n определяется интервалом времени T , на котором нужно её подсчитывать, и частотой отбора значений: $n = F_S T$. Тогда число умножений в секунду пропорционально F_S^2 .

Операция умножения более трудоёмка, чем сложение. Известен метод вычисления функции корреляции, где умножение заменяется сложением — клипированная функция корреляции [9]. Показано, что для сигналов с гауссовой статистикой он даёт результат, эквивалентный стандартному методу, а для негауссовых — довольно близкий:

$$\Phi_{\text{клип.}}(n) = \sum_{k=1}^N G(k)S(k-n), \quad G(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } S(k) > S_0, \\ 0, & \text{если } S(k) \leq S_0, \end{cases} \quad (7)$$

где S_0 — «порог клипирования».

Таким образом, есть два пути повышения экономичности работы алгоритма:

- 1) уменьшение частоты отбора значений для расчёта автокорреляции (насколько это возможно) без ущерба надёжности распознавания;
- 2) замена метода расчёта функции автокорреляции методом клипирования.

В данной работе с использованием методики, описанной выше, определена вероятность распознавания пешехода $P_{\text{п}}$ при заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}} = 2,8 \cdot 10^{-6}$ в зависимости от частоты отбора точек и метода расчёта функции автокорреляции. Результаты представлены в таблице. Из таблицы следует, что использование метода клипирования при расчёте функции автокорреляции не приводит к значительному ухудшению эффективности алгоритма для диапазона частот 32–512 Гц (максимальное ухудшение составило 93 вместо 95 % на частоте 32 Гц). Отметим, что выигрыш в трудоёмкости при использовании клипирования для расчёта функции автокорреляции определяется процессором. Снижение частоты отбора с 512 до 32 Гц даёт лишь незначительное уменьшение вероятности правильного распознавания пешехода ($P_{\text{п}} = 98$ % на частоте 512 Гц, $P_{\text{п}} = 93$ % на частоте 32 Гц), но приводит к уменьшению трудоёмкости алгоритма в $512^2/32^2 = 256$ раз.

Заключение. Приемлемая вероятность правильного распознавания пешехода $P_{\Pi} > 90\%$ при наработке на ложное срабатывание не менее 100 ч достигается при использовании метода клипированной автокорреляции и частоте отбора значений 32 Гц.

По результатам данного исследования было разработано программное обеспечение (прошивка) сейсмического датчика на базе микроконтроллера MSP430. Алгоритм работы датчика включал оцифровку сейсмического сигнала, цифровую фильтрацию, выпрямление, подсчёт клипированной функции автокорреляции и срабатывание (тревогу) по превышении КК заданного уровня. Проведены полевые испытания, в которых вероятность распознавания пешехода составила 95 %. За 120 ч не зафиксировано ни одной ложной тревоги. Энергопотребление датчика при работающем алгоритме составило 1,3 мВт, что соответствует расходу около 1 А/ч в год от батареи 12 В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чистова Г. К.** Модели и методы обработки сейсмических сигналов в системах распознавания. Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2003. 196 с.
2. **Мархакшинов А. Л., Спектор А. А.** Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 48–53.
3. **Звездинский С. С.** Всепогодная система охраны. Технические особенности построения периметровых вибрационных средств обнаружения // БДИ. 2005. № 1(58). С. 62–66.
4. **Succi G., Clapp D., Gampert R., Prado G.** Footstep detection and tracking // SPIE. 2001. **4393**. P. 22–29.
5. **Tian Y., Qi H., Wang X.** Target detection and classification using seismic signal processing in unattended ground sensor systems // IEEE Intern. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-93). Minneapolis, USA, 27–30 April, 1993. P. 4.
6. **Richman M. S., Deadrick D. S., Nation R. J., Whitney S. L.** Personnel tracking using seismic sensors // Proc. SPIE. 2001. **4393**. P. 14–21.
7. **Li D., Wong K. D., Hu Yu. H., Sayeed A. M.** Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor networks // IEEE Sign. Process. Magazine. 2002. P. 17–29.
8. **Porto V. W., Fogel L. J., Fogel D. B.** Using evolutionary computation for seismic signal detection: A homeland security application // IEEE Intern. Conf. on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety (CIHSPS'2004). Venice, Italy, 21–22 July, 2004. P. 62–66.
9. **Faran J. J., Hills R.** Correlators for signal reception // Harvard Acoustical Laboratory Technical Memo N 27. Cambridge: Acoustics Res. Lab., Harvard University, 1952. P. 58–65.

Поступила в редакцию 24 января 2011 г.