

## Пассивная сейсмическая локация: аппаратное и базовое программное обеспечение

М. А. РАЙФЕЛЬД, Д. О. СОКОЛОВА, А. А. СПЕКТОР\*

Новосибирский государственный технический университет, Россия

\*Контактный e-mail: [spectora@mail.ru](mailto:spectora@mail.ru)

Рассмотрены проблемы, возникающие при создании методов обработки сигналов в системах пассивной сейсмической локации. Представлена обобщенная структурная схема сейсмической охранной системы, дано описание статистических методов оптимальной обработки сейсмических сигналов для обнаружения объектов, их классификации, оценки траектории движения.

*Ключевые слова:* сейсмическая локация, сейсмическая система охраны, формирование выборки, цифровая обработка сигналов, классификация, обнаружение, математическая статистика.

### Введение

Одним из перспективных методов охраны объектов и территорий (в том числе государственных границ) является пассивная сейсмическая локация (ПСЛ), основанная на регистрации и анализе колебаний, которые возбуждаются в грунте при перемещении по его поверхности какого-либо объекта-нарушителя. В установленных в грунт чувствительных элементах, образующих сейсмическую антенну, формируются сигналы, которые по линиям связи поступают на обработку в электронный блок. Здесь они усиливаются и преобразуются в цифровую форму, что делает возможной последующую цифровую обработку с учетом конкретной задачи. В сейсмических системах охраны, как и в других локационных системах, решаются такие задачи, как обнаружение объектов, их классификация, оценка координат и параметров движения. Базовым теоретическим инструментом ПСЛ служит статистическая теория радиолокации [1–14].

Наряду с пассивным характером, особенностями систем ПСЛ являются наличие в составе оборудования большого числа датчиков, соединенных с центром обработки посредством сети передачи данных, а также нестационарность и неоднородность сигналов, быстрое изменение их свойств как во времени, так и в пространстве, многолучевой характер распространения сейсмических сигналов и частотно-зависимые свойства среды распространения. Кроме того, помехи в ПСЛ (среди которых основная — это сейсмический фон) представляют собой суперпозицию большого числа колебаний, вызванных различными по мощности и по удаленности от точки регистрации воздействиями на грунт. Следствием суперпозиции является нормализация распределения сейсмического фона. В связи с этим в сейсмических системах охраны используются адаптивные статистические принципы при синтезе алгоритмов обработки сигналов.

## 1. Структура аппаратно-технического комплекса системы ПСЛ

Обобщенная структурная схема системы ПСЛ, предназначенной для обеспечения автоматической охраны протяженного рубежа, приведена на рис. 1, а. Как правило, точечные сейсмические датчики (геофоны) располагаются в грунте таким образом, чтобы образовать фазированную антенную решетку, способствующую обнаружению источника сигнала и определению его местоположения.

Для оценки местоположения объекта методом триангуляции достаточно группы из трех точечных датчиков. Если скорость распространения сейсмической волны в грунте не известна, то для решения указанной задачи необходимо иметь как минимум четыре датчика. Проблема заключается в том, что измерение задержек сигнала при распространении в грунте сопряжено с ошибками (из-за помех и сейсмического фона), поэтому решение системы навигационных уравнений, как правило, находится с использованием критерия максимального правдоподобия [13]. В этом случае точность оценивания местоположения объекта можно повысить за счет увеличения объема наблюдений, что в ПСЛ достигается использованием большого числа разнесенных в пространстве датчиков.

Каждая система ПСЛ имеет некоторую зону контроля — участок на местности, где установлено определенное количество датчиков. Размер и конфигурация зоны определяются задачами, решаемыми конкретной системой. Для формирования зоны контроля могут быть использованы различные способы расположения датчиков, один из часто используемых вариантов показан на рис. 1, б. Если оцифровка, уплотнение сигналов и маршрутизация реализуются в самом датчике, в использовании группового устройства нет необходимости. Датчик в этом случае играет роль узла локальной сети передачи данных, обычно выполненной в соответствии со стандартом IEEE 802.15 (ZigBee).

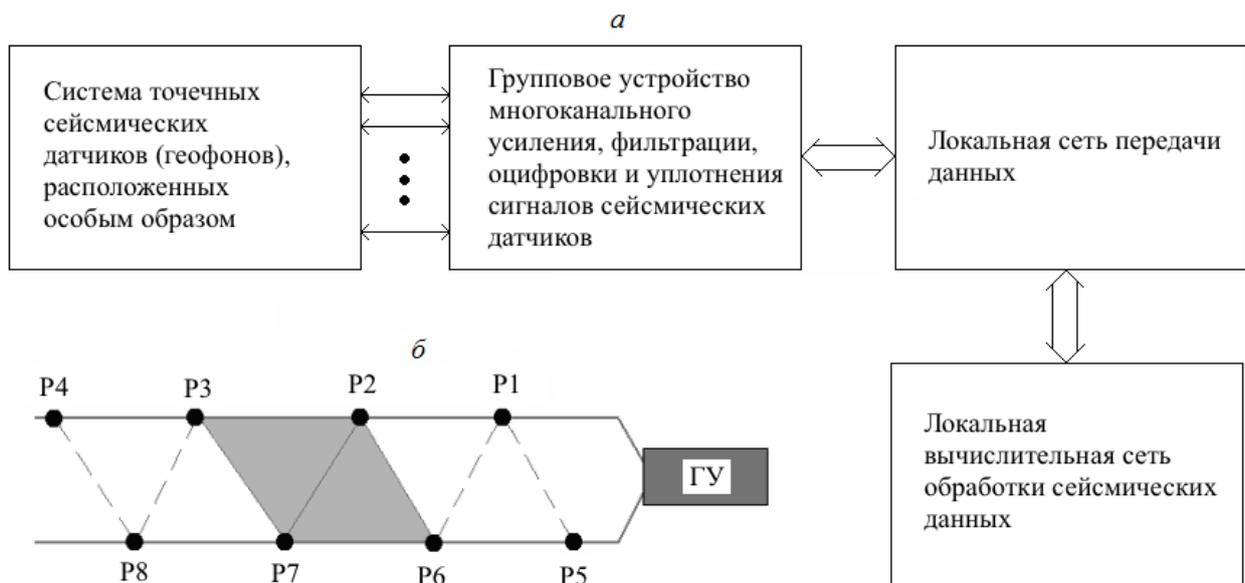


Рис. 1. Система ПСЛ: а — структурная схема; б — пример расположения датчиков; ГУ — групповое устройство

## 2. Принципы решения в ПСЛ основных локационных задач

Подход к построению алгоритма обнаружения сигнала зависит от назначения системы ПСЛ, поскольку структурные свойства сигналов определяются типом сейсмически активного объекта. Если предполагается использовать систему для обнаружения объекта определенного типа (когда наличие других типов исключается условиями применения), то алгоритмы обработки целесообразно максимально согласовать с характерными свойствами сейсмического сигнала, создаваемого данным объектом. Если в роли источника сейсмического возмущения выступают объекты различных типов с различными свойствами сигналов (в том числе и структурными), то обработка должна быть универсальной, сохраняющей высокие характеристики качества независимо от типа наблюдаемого объекта.

Рассмотрим процесс обнаружения сигналов, поступающих от сейсмических датчиков при движении одиночного человека [7]. В этом случае полезный сигнал представляет собой близкую к периодической последовательность импульсов. Примеры сигналов приведены на рис. 2. Огибающую сигнала в дискретном времени  $j$ , содержащего  $n$  импульсов длительности  $m$  отсчетов каждый, можно описать выражением

$$s_j = \begin{cases} \sqrt{d_1} & \text{при } j \in \Omega(T), \\ \sqrt{d_0} & \text{при других значениях } j, \end{cases}$$

где  $T$  — период следования импульсов (шагов);  $\Omega(T) = \{j \in [(k-1)T, (k-1)T+m-1], k = \overline{1, n}\}$  — множество моментов времени, включающее точки  $j$ , которые соответствуют участкам предполагаемого наличия сигнальных элементов (верхняя строка формулы);  $d_1, d_0$  ( $d_1 > d_0$ ) — дисперсии наблюдаемого сигнала на участке импульсного воздействия шага и в промежутке между шагами соответственно. На пассивных участках (между импульсами, которые вызваны шагами) сигнал обусловлен влиянием сейсмического фона, выступающего в роли помехи.

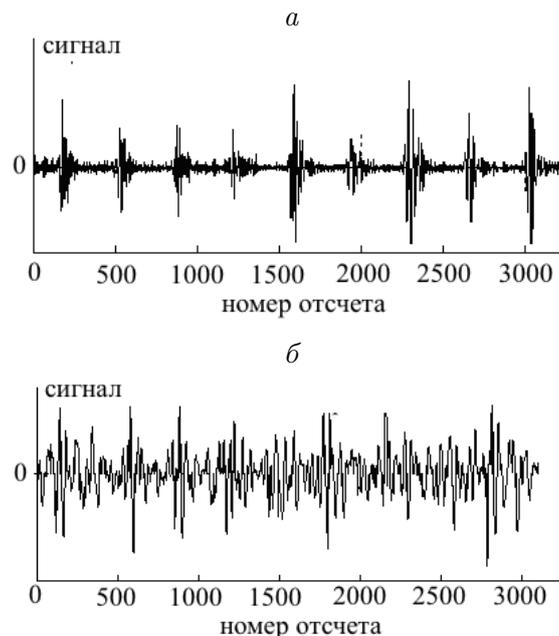


Рис. 2. Сейсмический сигнал, сформированный на выходе датчика, во время прохождения человека в зоне наблюдения: *а* — сильный, *б* — слабый

В работах [7, 9, 11–14] признано целесообразным в качестве предобработки проводить декорреляцию (выбеливание) исходного стохастического сигнала. Необходимо иметь в виду, что корреляционные свойства фона и полезного сигнала различаются. Это обусловлено особенностями вызывающих их сейсмических воздействий, а также различием сейсмических трасс, по которым возмущение доставляется в приемник. Реально текущему контролю доступны лишь корреляционные характеристики фона, поэтому адаптивное выбеливание осуществляется в соответствии с этими характеристиками. В результате образуется сигнал, в котором участки сейсмического фона заполнены дискретным белым шумом, а участки полезного сигнала представлены коррелированными последовательностями (хотя, как показывают исследования, здесь также проявляется тенденция к выравниванию спектра).

Сигнал  $u_j$  на всем интервале наблюдения может быть представлен в виде

$$u_j = \begin{cases} s_j \eta_j, & \text{сигнал имеется,} \\ \sqrt{d_0} \xi_j, & \text{сигнала нет,} \end{cases} \quad j \in [0, (n-1)T + m - 1],$$

где  $\xi_j$  — белый гауссовский шум с единичной дисперсией, а  $\eta_j$  — окрашенный гауссовский процесс.

В системе ПСЛ, как и в других локационных системах, необходимо контролировать вероятность ложного обнаружения, добиваясь стабильности работы системы на требуемом уровне, а также стремиться к максимизации правильного обнаружения, что соответствует критерию оптимальности Неймана — Пирсона. Этому требованию отвечает непараметрический обнаружитель, принцип работы которого состоит в следующем. Используется процедура, основанная на опорной выборке фона  $\mathbf{U} = \|u_1, u_2, \dots, u_R\|^T$  и рабочей выборке  $\mathbf{Y} = \|y_1, y_2, \dots, y_M\|^T$ . Символом “ $T$ ” обозначено транспонирование. Рабочая выборка получена в точках множества  $\Omega(T)$ , а следовательно, соответствует значению периода  $T$ . Определяются минимальный и максимальный элементы опорной выборки

$$u_{\min} = \min_i u_i, \quad u_{\max} = \max_i u_i$$

и число  $k_T$  элементов  $y_i$  рабочей выборки, таких что

$$y_i > u_{\max} \text{ или } y_i < u_{\min}.$$

В действительности точное значение периода следования импульсов неизвестно, однако можно указать диапазон  $[T_{\min}, T_{\max}]$ , в пределах которого оно находится. Поэтому далее определяются значения статистики  $k_T$  для всех возможных дискретных значений  $T \in [T_{\min}, T_{\max}]$ . Окончательное значение решающей статистики  $k$  определяется по правилу

$$k = \max_{T \in [T_{\min}, T_{\max}]} k_T,$$

тогда процедура принятия решения имеет вид

$$k \begin{cases} > k_0 \Rightarrow \text{сигнал есть,} \\ \leq k_0 \Rightarrow \text{сигнала нет.} \end{cases}$$

Было доказано [7], что описанный обнаружитель сейсмического сигнала обладает непараметрическим свойством в том смысле, что распределение решающей статистики  $k$  в отсутствие полезного сигнала не зависит от вероятностных характеристик сей-

смического фона, а это является основой для достижения стабильной величины вероятности ложного обнаружения. Установлено также, что по величине вероятности правильного обнаружения данный обнаружитель обладает достаточно высокими характеристиками.

Если тип сейсмически активного объекта заранее не определен, применяется другая процедура обнаружения сигнала, также обладающая непараметрическим свойством. Ее алгоритм не связан со структурными особенностями сигнала и также опирается на предварительное адаптивное выбеливание наблюдаемых данных. Последнее выполняется по результатам обучения на участках сейсмического фона. Этим достигается декорреляция сейсмического фона. Поскольку в процессе сейсмической локации спектрально-корреляционные характеристики полезных сигналов и фона различаются, после выбеливания по параметрам фона на участках сигнала последовательность отсчетов является окрашенным случайным процессом.

Работа универсального обнаружителя основана на использовании в качестве решающей статистики числа пересечений нуля процессом, образованным в результате выбеливания. Статистически число пересечений нуля максимально на участке белого шума (т.е. в области фона) и уменьшается при наличии в области анализа сейсмического сигнала любого объекта. Детальное исследование такого обнаружителя подтверждает наличие у него непараметрического свойства, также дающего возможность управлять вероятностью ложной тревоги, а также устанавливает достаточно высокую способность к обнаружению объектов, делающую перспективным его практическое использование [14].

При построении *алгоритма классификации объектов* следует учитывать, что объектами могут быть одиночный человек, группа людей, крупное животное, мелкое животное, транспортное средство, летательный аппарат, беспилотный движущийся объект и др. Поэтому особого внимания заслуживают универсальные подходы к определению класса, основанные на использовании статистик, структура которых не зависит от типа объекта.

Механизмы образования сигналов, регистрируемых сейсмическими датчиками, обусловлены многолучевым распространением волн в грунте и их суммированием в точке регистрации. Этим объясняется гауссовский характер распределения мгновенных значений. Следовательно, все особенности сейсмических сигналов, вызванных колебаниями грунта при перемещении различных объектов, могут быть описаны при помощи спектрально-корреляционных моделей. Одним из способов представления частотных спектров мощности является использование спектральных моментов, на основе которых создана технология классификации, использующая спектральные моменты в качестве вектора признаков [12].

На рис. 3 приведены примеры измеренной спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов различных сейсмически активных объектов после их выбеливания по параметрам математической модели сейсмического фона. Из рисунка видна степень влияния типа активного объекта на СПМ.

Вектор признаков  $\mathbf{Y}$  формируется следующим образом. Пусть  $G_i(f)$  — нормированная по полной мощности  $\int_0^{\infty} G_i(f)df = 1 \forall i$  СПМ преобразованного сейсмического сигнала для объекта  $i$ -го класса. Поскольку  $G_i(f) \geq 0$ , их точное представление может

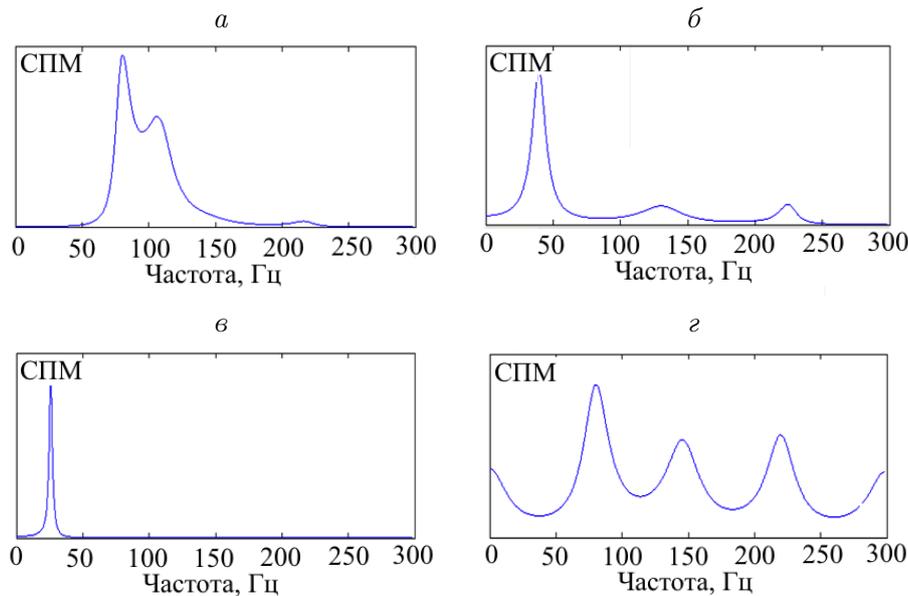


Рис. 3. Спектральная плотность мощности сейсмических сигналов самолета (а), автомобиля (б), человека (в) и фона (г)

быть основано на использовании множества начальных моментов  $x_k = \int_0^{\infty} f^k G_i(f) df, \dots,$

$k = 1, 2, \dots,$  либо комбинации начальных и центральных  $\hat{x}_k = \int_0^{\infty} (f - x_1)^k G_i(f) df$  мо-

ментов [15]. При конечном наборе моментов  $\mathbf{X} = \|x_1, x_2, \dots, x_K\|^T$  ( $k = \overline{1, K}$ ), вектор которых может служить в качестве признака для классификации сейсмоактивных объектов, получается приближенное представление СПМ. Ниже приведена классификация объектов на основе четырехмерного вектора признаков  $\mathbf{Y} = \|y_1, y_2, y_3, y_4\|^T$ , элементами которого являются:

$y_1 = x_1$  — начальный момент первого порядка СПМ  $G_i(f)$ ;

$y_2 = x_2 - x_1^2 = \hat{x}_2$  — центральный момент второго порядка;

$y_3 = \hat{x}_3 / \sqrt{\hat{x}_2^3}$  — коэффициент асимметрии функции  $G_i(f)$ ;

$y_4 = x_4/x_2^2 - 3$  — коэффициент эксцесса.

Пусть имеется множество  $I$  эталонных плотностей распределения вероятностей  $P(\mathbf{Y} | A_i)$ ,  $i = \overline{1, I}$ , вектора признаков  $\mathbf{Y}$  для  $I$  классов  $A_i$  объектов, подлежащих классификации. Статистический классификатор, работающий по принципу максимального правдоподобия, выносит решение по правилу

$$A^* = \operatorname{argmax}_{A_i} P(\mathbf{Y} | A_i).$$

Значения плотности распределения вероятностей рассчитываются заранее при использовании классифицированных сейсмических сигналов, т. е. применяется статистический классификатор, работающий по принципу обучения с учителем. В таблице приведены полученные экспериментальным путем данные, которые характеризуют эффективность описанной процедуры классификации. Как видно из таблицы, некоторая доля

## Результаты классификации объекта типа “человек”

Тип объекта	Вероятность решения
Человек	0.824
Группа из 2 человек	0.073
Группа из 3 человек	0
Крупное животное	0.030
Мелкое животное	0.073
Автомобиль	0
Самолет	0
Фон	0

ошибочных решений принимается в пользу группы людей, крупного и мелкого животного. При этом вероятность правильной классификации человека составила 0.824, что для сейсмической локации считается достаточно высокой величиной.

Как и в радиолокации, оценка характеристик движения объекта опирается на использование математической модели движения. Одной из наиболее простых является модель равномерного прямолинейного движения. Логика поведения нарушителя в зоне преодоления рубежа характеризуется стремлением пересечь его как можно быстрее, что приводит, как правило, к движению по прямолинейной траектории. Часто движение, отличное от равномерного и прямолинейного, может быть с достаточной точностью представлено в виде последовательности равномерно-прямолинейных участков.

На рис. 4 представлена траектория движения человека в зоне группы из трех сейсмических датчиков с номерами 0, 1, 2 вдоль прямой  $AB$  в декартовых координатах  $xOy$ . Скорость движения описывается вектором  $\mathbf{V} = \|v_x, v_y\|^T$ , направление характеризуется углом  $\alpha$ , точка с координатами  $\mathbf{z}_0 = \|x_0, y_0\|^T$  соответствует положению объекта в начальный момент наблюдения (например, после его обнаружения). Точки на прямой  $AB$  имеют координаты  $\mathbf{z}_i = \|x_i, y_i\|^T$  ( $i$  — номер шага) и указывают места на поверхности грунта, в которых производились последовательные удары при движении.

В принятых условиях траектория полностью определена, если известны начальные координаты  $\mathbf{z}_0$  и вектор скорости  $\mathbf{V}$ , поэтому анализ движения можно свести к получению оценок этих параметров. Процедура оценивания является двухэтапной и дина-

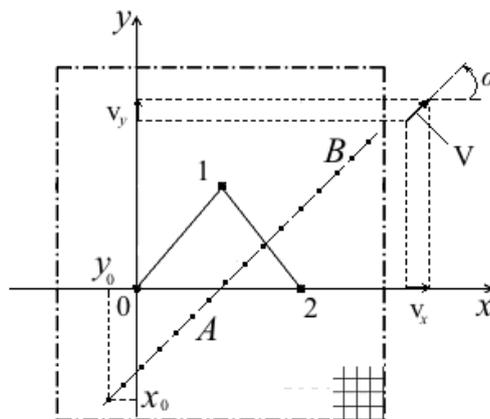


Рис. 4. Движение объекта в локальной окрестности группы датчиков

мической. Первичная обработка сигналов в датчиках состоит в определении моментов времени прихода сейсмических сигналов  $t_i^{(0)}, t_i^{(1)}, t_i^{(2)}$  на 0-й, 1-й и 2-й датчики соответственно последовательно для всех наблюдаемых шагов  $i = \overline{0, I}$  [9]. По найденным разностям задержек  $\Delta t_i^{(0,1)} = t_i^{(1)} - t_i^{(0)}$ ,  $\Delta t_i^{(1,2)} = t_i^{(2)} - t_i^{(1)}$ ,  $\Delta t_i^{(0,2)} = t_i^{(2)} - t_i^{(0)}$  при помощи очевидного соотношения

$$\Delta t_i^{(k,r)} = \frac{1}{c} \left( \sqrt{(x_i - x^{(r)})^2 + (y_i - y^{(r)})^2} - \sqrt{(x_i - x^{(k)})^2 + (y_i - y^{(k)})^2} \right),$$

$$k, r = 0, 1, 2,$$

для какой-нибудь пары измеренных разностей при различных комбинациях номеров датчиков  $k$  и  $r$ , известной скорости распространения сейсмических колебаний в грунте  $c$  и известных координатах  $X^{(0)} = \|x^{(0)}, y^{(0)}\|^T$ ,  $X^{(1)} = \|x^{(1)}, y^{(1)}\|^T$ ,  $X^{(2)} = \|x^{(2)}, y^{(2)}\|^T$  датчиков можно найти первичную оценку координат объекта  $\mathbf{z}_i^* = \|x_i^*, y_i^*\|^T$  на  $i$ -м шаге движения. Кроме этой оценки на данном шаге система располагает множеством аналогичных оценок, полученных на предыдущих шагах. Все имеющиеся оценки первого этапа  $\mathbf{Z}_i^* = \{\mathbf{z}_j^* = \|x_j^*, y_j^*\|^T, j = 0, 1, \dots, i\}$  являются исходными данными для получения оценок второго этапа.

На втором этапе с использованием гауссовского представления функции правдоподобия находятся оценки  $\hat{z}_{0i}$  и  $\hat{V}_i$  максимального правдоподобия искоемых параметров:

$$\hat{V}_i = \frac{1}{\delta t} \left[ \frac{12f_2(\mathbf{Z}_i^*)}{i(i+1)(i+2)} - \frac{6f_1(\mathbf{Z}_i^*)}{(i+1)(i+2)} \right],$$

$$\hat{z}_{0i} = \frac{2(2i+1)f_1(\mathbf{Z}_i^*)}{(i+1)(i+2)} - \frac{6f_2(\mathbf{Z}_i^*)}{(i+1)(i+2)},$$

где  $\delta t$  — время между первичными измерениями (период шагов при движении человека, постоянный в рамках принятой локальной модели движения) [11]. Функции  $f_1(\mathbf{Z}_i^*)$  и  $f_2(\mathbf{Z}_i^*)$  являются достаточными статистиками и определяются выражениями

$$f_1(\mathbf{Z}_i^*) = \sum_{j=0}^i z_j^* = f_1(\mathbf{Z}_{i-1}^*) + z_i^*,$$

$$f_2(\mathbf{Z}_i^*) = \sum_{j=1}^i j z_j^* = f_2(\mathbf{Z}_{i-1}^*) + i z_i^*,$$

из которых следует возможность их рекуррентного вычисления. Благодаря этому отсутствует необходимость хранения вектора  $\mathbf{Z}_i^*$  в процессе наблюдения объекта, так как в вычислениях учитывается лишь текущий элемент  $\mathbf{z}_i^*$  данного вектора. Начальные условия для этих рекуррентных процедур имеют вид

$$\hat{V}_1 = \frac{1}{\delta t} (z_1^* - z_0^*), \quad \hat{z}_{01} = z_0^*.$$

Результаты теоретического и экспериментального исследования описанного метода трассировки [11] свидетельствуют о достаточно высокой точности определения координат. Технологическим достоинством метода является рекуррентное получение текущих траекторных оценок (в темпе поступления сейсмических сигналов), точность которых возрастает к моменту окончания наблюдения.

## Заключение

Появление новой локационной техники на основе анализа сейсмических волн, возбуждаемых в поверхностном слое грунта движущимся объектом, выдвигает задачу создания математического и программного обеспечения систем ПСЛ. Условия работы этих систем характеризуются крайне разнообразными характеристиками сигнально-помеховой обстановки, их быстрыми изменениями как во времени, так и в пространстве. Как помехи, так и сигналы являются случайными процессами. Поэтому математическую основу обработки сейсмических сигналов может составить аппарат математической статистики и статистической радиолокации.

Наряду с требованиями высокой локационной эффективности (малых вероятностей ошибочных решений при обнаружении и классификации объектов, малых значений ошибок оценивания координат) существенно условие обработки сигналов в реальном времени. Это требует развития соответствующих вычислительных технологий, основанных на статистических методах обработки сигналов.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 2014/138, проект № 1176.

## Список литературы / References

- [1] **Gramann, R.A., Bennett, M.B., OBrien, T.D.** Vehicle and personnel detection using seismic sensors // Proc. of SPIE Conf. on Sensors, C31. Information, and Training Technologies for Law Enforcement. 1998. Vol. 3577. P. 74–85. doi: 10.1117/12.336952.
- [2] **Alyamkin, S.A., Nezhevenko, E.S.** Reconstructing the trajectory of a moving object in a seismic detection system with a limited number of sensors // Automation and Remote Control. 2014. Vol. 75, iss. 2. P. 200–207. doi: 10.1134/S0005117914020039.
- [3] **Ghosh, R., Akula, A., Kumar, S., Sardana, H.K.** Time-frequency analysis based robust vehicle detection using seismic sensor // Journal of Sound and Vibration. 2015. Vol. 346. P. 424–434. doi: 10.1016/j.jsv.2015.02.011.
- [4] **Алямкин С.А., Нежевенко Е.С.** Сравнительный анализ эффективностей фильтра Калмана и фильтра частиц при решении задачи сопровождения объекта в сейсмической системе обнаружения // Автометрия. 2014. № 1. С. 66–73.  
**Alyamkin, S.A., Nezhevenko, E.S.** Comparative analysis of the efficiency of the Kalman filter and particle filter in solving the problem of object tracking in a seismic security system // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2014. Vol. 50, iss. 1. P. 54–60. doi: 10.3103/S8756699014010075.
- [5] **Чистова Г.К.** Модели и методы обработки сейсмических сигналов в системах распознавания. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 196 с.  
**Chistova, G.K.** Models and methods for processing of seismic signals in recognition systems. Penza: Izdatel'stvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2003. 196 p. (In Russ.)
- [6] **Дудкин В.А.** Варианты построения пассивных сейсмических локаторов, основанных на измерении временных задержек // Современные технологии безопасности. 2005. № 4. С. 15–17.  
**Dudkin, V.A.** Options for the design of passive seismic locators based on the measurement of time delays // Sovremennye Tekhnologii Bezopasnosti. 2005. No. 4. P. 15–17. (In Russ.)

- [7] **Райфельд М.А., Спектор А.А.** Непараметрический метод обнаружения сигналов от сейсмически активных объектов // *Автометрия*. 2005. № 6. С. 88–97.  
**Raifel'd, M.A., Spektor, A.A.** Nonparametric method for detecting signals from seismically active objects // *Avtometriya*. 2005. No. 6. P. 73–80. (In Russ.)
- [8] **Liang, Z., Wei, J., Zhao, J.** The statistical meaning of kurtosis and its new application to identification of persons based on seismic signals // *Sensors*. 2008. No. 8. P. 5106–5119. doi: 10.3390/s8085106.
- [9] **Спектор А.А., Филатова С.Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // *Автометрия*. 2008. № 4. С. 68–74.  
**Spektor, A.A., Filatova, S.G.** Estimating the time position of pulses in seismic observation systems based on Markovian filtering // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2008. Vol. 44, iss. 4. P. 337–341. doi: 10.3103/S8756699008040080.
- [10] **Магауенов Р.Г.** Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия — Телеком, 2008. 496 с.  
**Magauenov, R.G.** Alarm systems: basic theory and principles of construction: Ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom, 2008. 496 p. (In Russ.)
- [11] **Мархакшинов А.Л., Спектор А.А.** Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // *Автометрия*. 2009. № 5. С. 48–53.  
**Markhakshinov, A.L., Spektor, A.A.** Estimating local characteristics of object motion in a seismic monitoring system // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2009. Vol. 45, iss. 5. P. 419–423. doi: 10.3103/S8756699009050082.
- [12] **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Классификация движущихся объектов по спектральным признакам сейсмических сигналов // *Автометрия*. 2012. № 5. С. 112–119.  
**Sokolova, D.O., Spektor, A.A.** Classification of moving objects based on spectral features of seismic signals // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012. Vol. 48, No. 5. P. 522–528. doi: 10.3103/S8756699012050135.
- [13] **Райфельд М.А., Коробов В.В.** Оценка координат в сейсмической системе наблюдений при неточном знании скорости распространения сигнала в грунте // *Докл. АН ВШ РФ*. 2012. № 2(19). С. 87–94.  
**Rajfeld, M.A., Korobov, V.V.** Location estimate in seismic observation system in the inaccurate knowledge of signal propagation in soil // *Proc. of the Russ. Higher School Acad. of Sci.* 2012. No. 2(19). P. 87–94. (In Russ.)
- [14] **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Непараметрическое обнаружение стохастических сигналов, основанное на пересечениях с “нулем” // *Вест. Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2013. № 1. С. 138–146.  
**Sokolova, D.O., Spektor, A.A.** Nonparametric Detection of stochastic signals, based on the intersections with the “zero” // *Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2013. No. 1. P. 138–146. (In Russ.)
- [15] **Левин Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.  
**Levin, B.R.** Theoretical foundations of statistical radio engineering. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Radio i Svyaz', 1989. 656 p. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 18 ноября 2015 г.,  
с доработки — 15 декабря 2015 г.*

**Passive seismic location: hardware and basic software**

RAJFELD, MIKHAIL A., SOKOLOVA, DARYA O., SPECTOR, ALEXANDER A.\*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russia

\*Corresponding author: Spector, Alexander A., e-mail: [spectora@mail.ru](mailto:spectora@mail.ru)

The major direction of addressing the protection of unsafe objects as well as the protection of large areas lies in the improvement of the technical means. Among them, ever increasing attention is paid to seismic monitoring tools based on the use of signals of seismic sensors. It is inspired by a number of advantages of such systems and, in particular, their absolute confidentiality. In this paper we will discuss the seismic alarm system. It is shown that when the sensors form a phased array antenna, the detection of the signal source and the estimates of its location are facilitated.

Seismic signals reveal the information about movement of an object, its kind as well as its position. Therefore seismic signal processing should target the above mentioned properties. The article describes the statistical methods for optimal processing of seismic signals. The main problems that should be solved by the seismic monitoring systems are formulated, the methods of solving them depending on the specific systems are proposed. So the work shows the different detection methods targeted not only at the objects of a certain type, but rather a universal method of processing that provides high quality regardless of the type of the object. The universal approach has been used for the development of classification method based on the use of statistics, the structure of which does not depend on the type of object. Also, the authors proposed a method for tracing, which has the advantage of getting a recurrence current trajectory estimates, the accuracy of which increases with time of observation. The requirement of signals processing in real time and a high level of the stirring signals caused by the presence of a seismic background are essential. These require the development of appropriate computational techniques based on statistical methods of signal processing.

*Keywords:* seismic location, seismic protection system, a statistical approach, sampling, digital signal processing, classification, detection, statistical estimation.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, according to the state assignment No. 2014/138, project No. 1176.

*Received 18 November 2015*

*Received in revised form 15 December 2015*