

УДК 527.62

## ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

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

*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: spektor@corp.nstu.ru*

Рассмотрено применение энергетических параметров сигналов для оценки движения объектов с непрерывным воздействием на грунт в системах пассивной сейсмической локации. Предложены статистики для измеренных значений мощностей сигналов с учётом энергетических свойств среды. Проанализировано влияние перемещения объекта на отношение мощностей сигналов на различных датчиках. Приведены результаты проверки алгоритма оценки параметров траектории прямолинейного движения автомобиля.

*Ключевые слова:* пассивная сейсмическая локация, оценка траектории, метод максимального правдоподобия, энергетические свойства среды, геофон.

DOI: 10.15372/AUT20180304

**Введение.** Одной из решаемых в системах пассивной сейсмической локации (ПСЛ) задач является определение траектории движения наблюдаемого сейсмически активного объекта [1, 2]. Ввиду случайности сейсмических помех (основа которых — фон) и сейсмических полезных сигналов (источником служит давление на грунт перемещаемых по нему объектов) определение характеристик движения представляет собой статистическую задачу. Физические принципы её решения близки к методам многопозиционной радиолокации и радионавигации [3, 4]. В качестве первичных измерений используются параметры (называемые радионавигационными), значения которых связаны с координатами положения объекта и которые поддаются оцениванию путём соответствующей обработки принятых сигналов. С их помощью вычисляются необходимые характеристики движения объекта — текущие координаты и иногда значения вектора скорости.

Часто объектом наблюдения для ПСЛ, применяемой в технической системе охраны, является идущий человек. С этим связано использование в качестве навигационных параметров временных задержек сейсмических сигналов в одних сейсмических датчиках относительно других. При известной скорости распространения сейсмических волн совокупность таких измерений даёт возможность определить координаты. Минимальное число независимых измерений равно 2 обеспечивает однозначное решение задачи, а увеличение этого числа может быть использовано для снижения ошибок за счёт рациональной статистической обработки. Применение временных задержек обусловлено импульсным характером сигналов от человека, делающим возможным оценивание их времён прихода в сейсмические приёмники. В связи с этим появились исследования, направленные на создание методов оценивания времени прихода сейсмического импульсного сигнала [5, 6].

Другим типом навигационного параметра, которому в ПСЛ должно уделяться внимание пока не уделялось, является его интенсивность, зависящая от расстояния между объектом наблюдения и сейсмическим датчиком и, таким образом, содержащая в себе информацию о местоположении объекта. Качество этой информации, скорее всего, более низкое, чем в измерениях временных задержек, вследствие того что сейсмические помехи оказывают на

интенсивность сигналов прямое воздействие, в то время как их воздействие на фиксируемое время прихода является косвенным и, по-видимому, более слабым.

Цель данной работы — развитие метода оценки траектории движения транспортно-го средства на основе использования зависимости мощностей сейсмических сигналов от расстояний между источником и сейсмическими приёмниками.

**Применение энергетических параметров сигналов для статистической оценки движения объектов с непрерывным воздействием на грунт.** Использование интенсивности имеет особое значение, если временные параметры не играют такой роли, как в случаях импульсных воздействий объектов. Эти проблемы возникают, когда объектами наблюдения являются транспортные средства, при движении которых образуются непрерывные сигналы. Возбуждаемые сейсмические сигналы представляют при этом непрерывные случайные процессы с гауссовским распределением и изменяющейся корреляционной функцией. Причинами нестационарности являются эффект Доплера, а также изменения характеристик среды распространения сейсмических волн с изменением расстояния: эквивалентный фильтр, описывающий влияние среды, более низкочастотный при больших расстояниях и более широкополосный для объекта на меньших расстояниях.

Для описания положения объекта на поверхности земли применим декартовы координаты  $(x, y)$ . Соответствующая система координат создаётся в устройстве ПСЛ при его размещении на рабочей территории. В данном случае все датчики, входящие в состав сейсмических антенн, получают свои координаты  $(x_n, y_n)$ ,  $n = \overline{1, N}$ , где  $N$  — общее число датчиков. На основе энергетических характеристик сигналов этих датчиков система может решать свои задачи обнаружения, классификации, трассировки [7–10].

В соответствии с [11] распространение сейсмических колебаний на границе сред происходит в виде поверхностных поперечных волн Рэлея и Лява. Если волна регистрируется одномерным геофоном с вертикальным расположением чувствительного датчика, то основное влияние на выходной сигнал оказывает волна Рэлея. Её амплитудное затухание в почве зависит от многих факторов [11]. При отсутствии многолучевого распространения амплитуду сигнала  $u(f, r)$  при гармоническом воздействии на сейсмическом датчике можно определить выражением

$$u(f, r) = r^{-0,5} \exp(-\rho\pi fr). \quad (1)$$

Здесь  $r$  — расстояние от источника возмущения до датчика;  $f$  — частота возбуждаемого в грунте сигнала;  $\rho$  — коэффициент потерь, зависящий от типа грунта и не зависящий от частоты. Постоянная  $\alpha = \rho\pi f$  представляет собой коэффициент диффузии. Поскольку реальное воздействие на грунт является достаточно широкополосным и близко (в полосе системы) к белому шуму, его спектральную плотность мощности можно считать равномерной и равной  $N_0/2$ . Тогда мощность сигнала на выходе датчика запишем в виде

$$P = \frac{N_0}{2r^2} \int_0^{\infty} |H(j2\pi f)|^2 \exp(-2\rho\pi fr) df, \quad (2)$$

где  $H(j2\pi f)$  — комплексная частотная характеристика датчика. Типовой сейсмический датчик (геофон) имеет частотную характеристику, близкую к характеристике колебательного звена:

$$H(j2\pi f) = 1/(1 + j4\pi f\xi - (2\pi fT)^2), \quad (3)$$

где  $T = 1/f_0$  — период резонансной частоты  $f_0$ ;  $\xi > 0$  — затухание. Вычисление интеграла в (2) с учётом (3) даёт величину, пропорциональную  $r^{-0,5}$ . Поэтому общий вид зависимос-

ти интенсивности сигнала (его мощности) на выходе датчика от расстояния представим как

$$P = \mu/r^{1,5} \quad (4)$$

( $\mu$  — энергетический параметр, определяемый интенсивностью сейсмического воздействия). При стационарном размещении системы в ряде случаев значение данного параметра измеряется при подготовке к эксплуатации. В более общей постановке энергетический параметр может быть включён в число оцениваемых при увеличении размерности статистической задачи.

**Использование в качестве первичных данных отношения мощностей (или среднеквадратичных значений) сигналов в различных парах датчиков.** Образованные при этом данные  $s_{n,l}$  на основе датчиков с номерами  $n$  и  $l$  с учётом (4) имеют вид

$$s_{n,l} = P_n/P_l = (r_l/r_n)^{1,5} \quad (5)$$

и не зависят от энергетического параметра. В (5)  $r_n$  и  $r_l$  — расстояния от точки сейсмического воздействия до этих датчиков.

Статистика, используемая в качестве измеренного значения мощности сигнала на  $n$ -м датчике в  $j$ -м цикле работы системы, определяется выражением

$$U_{nj} = \sum_{m=1}^M u_{njm}^2 / M. \quad (6)$$

Здесь  $u_{njm}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , — оцифрованный выходной сигнал длиной  $M$  отсчётов (равной длительности цикла). Случайные величины  $U_{nj}$  в силу большого значения числа слагаемых  $N$  подчиняются гауссовским распределениям с математическими ожиданиями, обратно пропорциональными расстояниям от источника возбуждения сейсмических волн до приёмников:  $\bar{U}_{nj} = \mu/r_{nj}^{1,5}$ . Эксперименты показывают, что среднеквадратические отклонения величин  $U_{nj}$  можно оценить значениями  $\sigma_{nj} = \bar{U}_{nj}/3$ . С учётом этого функцию правдоподобия для получения однократных (предварительных, найденных в пределах одного  $j$ -го цикла) оценок координат представим в виде

$$P(U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{Nj} | x_j, y_j) = \prod_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\mu/3r_{nj}^{1,5}} \exp \left\{ -\frac{(U_{n,j} - \mu/r_{nj}^{1,5})^2}{2(\mu/3r_{nj}^{1,5})^2} \right\}, \quad (7)$$

где учтена независимость статистик  $U_{nj}$  для разных датчиков системы, а также зависимость расстояний  $r_{n,j}$  от номера рабочего цикла из-за движения объекта. Отыскание текущей оценки  $\mathbf{z}_j^* = (x_j, y_j)^t$  в  $j$ -м цикле можно выполнить путём дискретизации рабочей области с шагами  $\Delta x, \Delta y$  по соответствующим координатам, вычисления значения функции (7) в узлах полученной решётки и определения точки её максимального значения.

**Сглаживание первичных оценок.** Далее осуществляется сглаживание первичных оценок  $\mathbf{Z}_i^* = \{\mathbf{z}_j^*, j = \overline{1, i}\}$ , полученных в отдельных циклах, опирающееся на математическую модель движения объекта. Используя модель прямолинейного и равномерного движения, имеем

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{z}_{j-1} + \mathbf{V}\Delta t = \mathbf{z}_0 + j\mathbf{V}\Delta t, \quad (8)$$

где  $\mathbf{z}_j$  — координаты объекта на  $j$ -м шаге;  $\mathbf{V}$  — вектор скорости;  $\Delta t$  — интервал дискретизации. При этой модели оценивание траектории состоит в получении измеренных значений начальных координат  $\mathbf{z}_0^*$  и вектора скорости  $\mathbf{V}^*$ . Задача такого вида рассматривалась в

[9], её решение для наблюдений на протяжении  $i$  циклов имеет вид

$$\mathbf{V}^* = \frac{1}{\Delta t} \left( 12 \sum_{j=1}^i \mathbf{z}_j^* / i(i+1)(i+2) - 6 \sum_{j=1}^i j \mathbf{z}_j^* / (i+1)(i+2) \right); \quad (9)$$

$$\mathbf{z}_0^* = \frac{1}{\Delta t} \left( 2(2i+1) \sum_{j=1}^i \mathbf{z}_j^* / (i+1)(i+2) - 6 \sum_{j=1}^i j \mathbf{z}_j^* / (i+1)(i+2) \right).$$

**Влияние перемещения объекта на статистику отношения мощностей.** Существенным фактором, приводящим к разрушению корреляционных связей между сигналами датчиков, является многолучевой характер распространения сейсмических колебаний в грунте [7]. Сигнал, регистрируемый геофоном, представляет собой суперпозицию сигналов, имеющих различные амплитуды и взаимные задержки.

Необходимо отметить, что в каждый момент времени происходит изменение многолучевой картины при перемещении источника возбуждения. Влияние указанного фактора очень похоже на последствия фединга, хорошо изученного в связи и радиолокации. Фединг приводит к глубоким замираниям — уменьшению огибающей (амплитуды) сигнала, причём этот процесс носит статистический характер. Если сигнал представляет собой узкополосный гауссовский процесс, то при близких по величине амплитудах лучей огибающая подчиняется рэлеевскому распределению, а её квадрат (мгновенная мощность) имеет экспоненциальное распределение. Принимая в качестве рабочей статистики отношение мощностей  $p_n$  и  $p_l$  сигналов на  $n$ -м и  $l$ -м датчиках:  $s = p_n/p_l$ , имеем для случайных величин  $s$  распределение вида

$$P(s) = \theta / (1 + \theta s)^2, \quad (10)$$

где параметр  $\theta = (r_l/r_n)^{1,5}$  представляет собой функцию отношения расстояний от источника возмущения до датчиков. Таким образом, информацию об отношении расстояний двух датчиков до объекта несёт параметр  $\theta$  и именно его необходимо оценивать на основе выборки, состоящей из  $K$  отношений мгновенных мощностей на этих датчиках. Считая отношения мощностей в разные моменты времени независимыми, можно с использованием (10) записать их совместное распределение:

$$P(s_1, s_2, \dots, s_K / \theta) = \prod_{k=1}^K \theta / (1 + \theta s_k)^2. \quad (11)$$

Оценку максимального правдоподобия параметра  $\theta$  на основе выражения (11) представим в виде

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} P(s_1, s_2, \dots, s_K / \theta) = \arg \max_{\theta} \prod_{k=1}^K \theta / (1 + \theta s_k)^2. \quad (12)$$

Нахождение максимума в (12) предполагает выполнение дифференцирования функции правдоподобия  $P(s_1, s_2, \dots, s_K / \theta)$  по  $\theta$  и решение уравнения

$$dP(s_1, s_2, \dots, s_K / \theta) / d\theta = d \sum_{k=1}^K \log(\theta / (1 + \theta s_k)^2) / d\theta = 0. \quad (13)$$

Выполняя дифференцирование левой части уравнения (13), получаем

$$\sum_{k=1}^K \theta s_k / (1 + \theta s_k)^2 = K/2. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) относительно  $\theta$  является искомой максимально правдоподобной (МП) оценкой отношения расстояний  $r_k/r_n$  от источника возбуждения до датчиков и возможно только численно. Исследования показали, что численное решение (14) очень близко к величине, обратной медиане выборки отношений мгновенных мощностей на датчиках  $s_1, s_2, \dots, s_K$ :

$$\hat{\theta} \approx 1/S_K^{(K/2)}, \quad (15)$$

где  $S_K^{(K/2)}$  — медиана выборки  $s_1, s_2, \dots, s_K$ . Рис. 1 поясняет это утверждение. Он также демонстрирует низкую точность оценки параметра  $\theta = 1/\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_k$  при использовании среднего выборочного значения вместо медианы.

Заметим, что оценка параметров  $\theta$ , получаемая описанным методом, формируется на основе выборки объёма  $K$  элементов, которая образуется из всех отсчётов сигналов соответствующей пары датчиков рабочей группы на интервале оценивания. При цикловой организации функционирования системы таким временным интервалом может служить рабочий цикл.

С учётом модели затухания мощности сигнала (3) координаты объекта (при рабочей группе из трёх датчиков) могут быть определены в результате решения системы нелинейных уравнений следующего вида:

$$\frac{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = s_{01}^{1/1,5}; \quad \frac{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = s_{02}^{1/1,5}, \quad (16)$$

где  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \{0, 1, 2\}$ , — декартовы координаты датчиков;  $(x, y)$  — координаты объекта, которые необходимо найти. Очевидно, что вследствие шумов система уравнений (9)

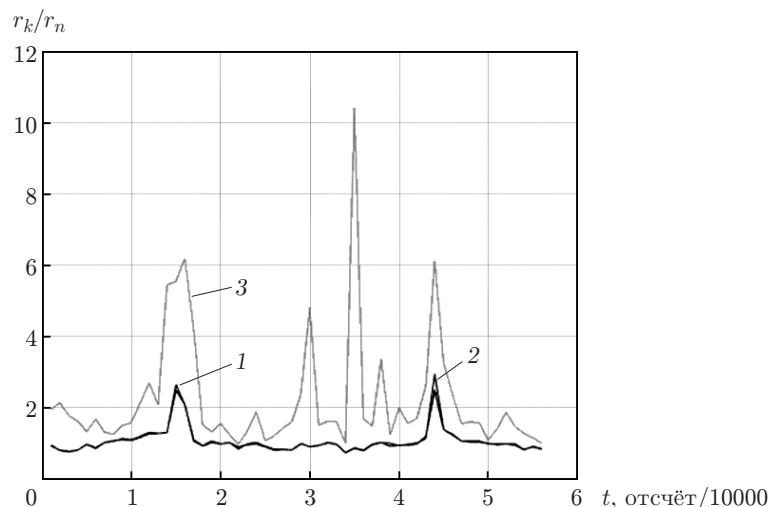


Рис. 1. Оценки отношения расстояний от источника сигнала до датчиков  $r_k/r_n$ , полученные с использованием разных алгоритмов (выборка 1000 отсчётов):

$$\arg \max_{\theta} \prod_{k=1}^K \theta / (1 + \theta s_k)^2 \text{ (кривая 1); } 1/S_K^{(K/2)} \text{ (кривая 2); } 1/\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_k \text{ (кривая 3)}$$

не может иметь решения. Нахождение координат нарушителя в этом случае рассматривается как статистическая задача их оценки в рамках какого-либо критерия (например, максимального правдоподобия). Данный подход позволяет уточнять оценку координат в результате привлечения измерений отношений мощностей на большом числе датчиков. Процедура, реализующая МП-оценку координаты автомобиля в соответствии с (9), может быть построена с использованием табличного метода. Область возможного нахождения автомобиля представляется в виде дискретного множества точек, взятых с некоторым шагом, например 1 или 0,5 м. Для каждой точки области предварительно рассчитываются отношения расстояний до некоторого числа датчиков (группы датчиков заданного размера), т. е.  $\{r_1/r_0, r_2/r_0, r_3/r_0, \dots, r_n/r_0\}$ . Числа заносятся в таблицу в привязке к заданной точке. Вместо абсолютного значения отношения расстояний можно использовать его логарифм. Далее по реализациям квадратов огибающих сейсмических сигналов находятся оценки отношений  $r_i/r_j$ , т. е.  $\hat{\theta}_{i,j}$  либо  $\log(\hat{\theta}_{i,j})$ . Эти оценки вычисляются для соответствующих пар датчиков группы. Далее в таблице находится точка, в которой отношения расстояний наиболее близки к измеренным по реализациям сигналов в смысле заданного критерия. Наибольшую эффективность показала корреляционная метрика близости измеренных статистик  $\hat{\theta}_{i,j}$  к табличным значениям:

$$\lambda_1 = \frac{(r_1/r_0)\hat{\theta}_{1,0} + (r_2/r_0)\hat{\theta}_{2,0} + \dots + (r_n/r_0)\hat{\theta}_{n,0}}{\sqrt{(r_1/r_0)^2 + (r_2/r_0)^2 + \dots + (r_n/r_0)^2} \sqrt{(\hat{\theta}_{1,0})^2 + (\hat{\theta}_{2,0})^2 + \dots + (\hat{\theta}_{n,0})^2}}. \quad (17)$$

Проведённые на практике исследования продемонстрировали, что предложенный алгоритм трассировки автомобиля, использующий для оценки его координат статистики отношений мощностей, измеряемых на различных датчиках, является достаточно эффективным в вычислительном плане вследствие применения табличных методов нахождения МП-оценки координат.

На рис. 2 приведён результат экспериментальной проверки работы алгоритма оценки параметров  $\mathbf{z}_0$  и  $\mathbf{V}$  траектории при прямолинейном движении автомобиля, основу которого составляют предварительные локальные оценки на базе максимизации (7) и траекторные оценки параметров на базе (8), (9). Эксперимент проводился на сейсмическом полигоне Новосибирского государственного технического университета, на котором установлено устройство ПСЛ «Азимут 1» [10]. Точками, соединёнными сплошными линиями, показаны фрагменты двух сейсмических антенн. Крестики обозначают локальные оценки в

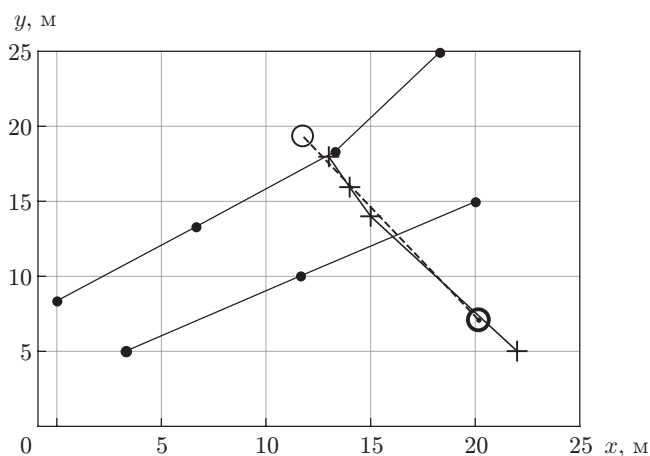


Рис. 2. Иллюстрация экспериментальной проверки алгоритма

каждом из четырёх рабочих циклов, штриховая линия отображает финальную измеренную трассу автомобиля, выполнявшего поперечный проезд, пересекающий линии обеих антенн. Точность, с которой фиксировалась истинная линия проезда, соизмерима с точностью оценок, и её положение находится в области обеих полученных оценок. Ошибки определения траектории в эксперименте не превышали 1 м.

**Заключение.** Предложенный метод обработки сейсмических сигналов на основе статистики их энергетических параметров позволяет с приемлемой точностью оценить траекторию движения объекта с непрерывным воздействием на грунт. Применение отношений мощностей сигналов с разных датчиков даёт возможность оценивать траекторию без учёта энергетического параметра среды. Получена оценка отношения расстояний от датчиков до объекта через отношение мощностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сытенький В. Д.** Определение координат источника сейсмических волн амплитудным методом пассивной локации // Геодинамика и тектонофизика. 2012. **3**, № 4. С. 409–416.
2. **Бронников А. А., Котов В. В., Никитенков Д. С.** Периметровая пассивная сейсмическая система охраны объекта // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2009. Вып. 2, ч. II. С. 222–226.
3. **Справочник по радиолокации.** Т. 4. Радиолокационные станции и системы /Под ред. М. М. Вейсбейна. М.: Сов. радио, 1978. 376 с.
4. **Ярлыков М. С.** Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 344 с.
5. **Чебров Д. В., Гусев А. А.** Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение // Сейсмические приборы. 2010. **46**, № 3. С. 35–37.
6. **Спектор А. А., Филатова С. Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 68–74.
7. **Коробов В. В., Райфельд М. А.** Оценка координат в сейсмической системе наблюдения при неточном знании скорости распространения сигнала в грунте // ДАН ВШ РФ. 2012. **19**, № 2. С. 87–94.
8. **Спектор А. А., Морозов Ю. В.** Оценка параметров движения автомобиля в пассивной сейсмической локации // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 99–101.
9. **Мархакшинов А. Л., Спектор А. А.** Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 48–53.
10. **Морозов Ю. В., Спектор А. А.** Классификация объектов на основе анализа спектральных характеристик огибающих сейсмических сигналов // Автометрия. 2017. **53**, № 6. С. 49–56.
11. **Cautes G., Nastac S.** Mathematical model for frequency-dependent soil propagation analysis // The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. 2002. **XIV**. P. 23–26.

*Поступила в редакцию 5 февраля 2018 г.*