

Для цитирования: Спектор А. А., Морозов Ю. В. Оценка параметров движения автомобиля в пассивной сейсмической локации // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 99–101. УДК 621.372.54

А. А. Спектор¹, Ю. В. Морозов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ В ПАССИВНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

В статье предложен метод оценки траектории автомобиля на основе энергетических характеристик сейсмического сигнала. Данный метод основан на оценках максимального правдоподобия начального положения и вектора скорости автомобиля. Вычислительный эксперимент, проведенный для сейсмических сигналов автомобиля, подтвердил достоверность таких оценок.

Ключевые слова: сейсмическая система охраны, максимальное правдоподобие, энергия сигнала.

Введение

Одной из основных задач пассивной сейсмической локации (ПСЛ) является получение оценок координат объектов, следствием движения которых является возбуждение сейсмических волн в поверхностных слоях грунта. Для образования оценок используются сейсмические сигналы, принятые датчиками распределенной антенной системы с известной геометрией размещения на поверхности земли.

Сигналы объектов, оказывающих импульсное воздействие на грунт (человек, животное), имеют импульсный характер. Это дает возможность получать оценки характеристик движения, основанные, например, на использовании разностей моментов прихода [1–3]. Такая возможность отсутствует, когда воздействие объекта на грунт является непрерывным, характерным примером такого объекта является автомобиль. Поскольку сейсмические сигналы, полученные на разнесенных сейсмических датчиках при расстояниях между ними 2–3 м, практически некогерентны, измерение относительных временных сдвигов невозможно.

В пассивной радиолокации известны исследования [4], в которых для оценки координат летательных аппаратов применяется обратная зависимость интенсивности сигнала от дальности излучающего объекта. В данной статье предлагается развить аналогичный подход применительно к пассивной сейсмической локации, технологии которой находят применение в сейсмических системах охраны (ССО).

Постановка задачи

Дальность наблюдения сейсмически активных объектов относительно невелика и, в зависимости от интенсивности объектов и свойств грунтов,

составляет единицы-десятки метров. При этих условиях обычно оправдана математическая модель прямолинейного равномерного движения объекта наблюдения на протяжении всего времени его наблюдения. Обработку сигналов в системах ПСЛ целесообразно осуществлять в форме последовательности временных циклов, небольшая длительность которых ($\Delta t = 1 \div 2$ с) позволяет пренебречь в ее пределах движением объекта.

Оценку траектории движения автомобиля можно осуществить, если в число оцениваемых параметров включить пару декартовых координат $\mathbf{z}_0 = \|\|x_0, y_0\|\|^T$ его местоположения в начальный момент наблюдения и пару декартовых проекций вектора скорости движения $\mathbf{V} = \|\|V_x, V_y\|\|^T$, поскольку для любого j -го цикла координаты $\mathbf{z}_j = \|\|x_j, y_j\|\|^T$ определяются очевидным образом: $\mathbf{z}_j = \mathbf{z}_0 + j\Delta t\mathbf{V}$. Здесь верхний индекс T обозначает операцию транспонирования.

Решение разбивается на два этапа. Задачей первого является последовательное получение локальных оценок координат \mathbf{z}_j^* для всех отдельных циклов наблюдения. На втором этапе на каждом i -м цикле формируются последовательно уточняющиеся оценки параметров траектории \mathbf{z}_{0i}^* и \mathbf{V}_i^* , входными данными для которых служат множества предварительных оценок координат $\mathbf{Z}_i^* = \{\mathbf{z}_j^*, j = \overline{1, i}\}$. Таким образом, вся работа алгоритма встраивается в текущее время, а наиболее точные оценки траекторных параметров образуются в конце наблюдения, поскольку они оказываются основанными на всем множестве доступных данных.

Алгоритмы отыскания параметров движения

В работе на первом этапе обработки участвуют активные датчики с номерами $k = \overline{1, K}$, на которых

зафиксировано наличие сигнала автотранспортного объекта. В качестве исходных данных для траекторного анализа в j -м цикле используются статистики $U_{kj} = \frac{\sum_{n=1}^N u_{kjn}^2}{N}$, имеющие смысл средних мощностей сигнала. Здесь N – число цифровых отсчетов сигнала за время одного цикла.

Случайные величины U_{kj} , в силу большого значения числа слагаемых N , подчиняются гауссовским распределениям с математическими ожиданиями, обратно пропорциональными расстояниям от источника возбуждения сейсмических волн до приемников: $\bar{U}_{kj} = \mu/R_{kj}$. Эксперименты показывают, что среднеквадратические отклонения (СКО) величин U_{kj} можно оценить значениями $\sigma_{kj} = \bar{U}_{kj}/7$, «защищающими» энергетические характеристики U_{kj} от принятия отрицательных значений [5].

Энергетический параметр μ определяется физическими свойствами среды распространения сейсмических волн. В случаях стационарного использования системы ПСЛ его значение может быть предварительно оценено, при этом его величина применительно к рассматриваемой задаче может считаться известной. В более общей постановке данный параметр следует включать в число неизвестных, расширяя на единицу множество находимых оценок. В данной работе полагаем значение параметра μ известным. С учетом этого представим функцию правдоподобия (ФП) искомых локальных координат в виде

$$P(U_{1,j}, U_{2,j}, \dots, U_{K,j} | x_j, y_j) = \prod_{k=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi} \mu / 3R_{k,j}} \exp \left\{ -\frac{(U_{k,j} - \mu/R_{k,j})^2}{2(\mu/3R_{k,j})^2} \right\}, \quad (1)$$

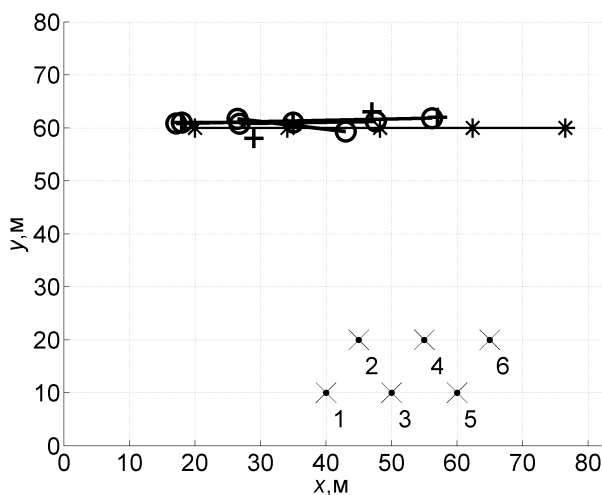


Рисунок 1. Оценка траектории автомобиля в сейсмической системе охраны для 6 датчиков

где $R_{k,j} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2}$ – расстояние между k -м датчиком и автомобилем на j -м цикле наблюдения. Локальные координаты автомобиля определяются значениями $\mathbf{z}_j^* = \|x_j^*, y_j^*\|^T$, максимизирующими функцию правдоподобия. Простой способ отыскания точки максимума состоит в нанесении прямоугольной сетки в двумерном пространстве x_j, y_j , вычислении ФП во всех узлах сетки и прямом нахождении искомой точки.

Задача второго этапа состоит фактически в сглаживании первичных оценок $\mathbf{Z}_i^* = \{\mathbf{z}_j^*, j = \overline{1, i}\}$ и, как результат, представлении траектории в виде прямолинейного равномерного движения с неизвестными векторами параметров \mathbf{z}_0 и V . Выражения для оценок этих параметров были получены в [1]

$$\hat{V}_i = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{12 \sum_{j=1}^i z_j^*}{i(i+1)(i+2)} - \frac{6 \sum_{j=1}^i j z_j^*}{(i+1)(i+2)} \right) \quad (2)$$

$$\hat{z}_{0i} = \left(\frac{2(2i+1) \sum_{j=1}^i z_j^*}{(i+1)(i+2)} - \frac{6 \sum_{j=1}^i j z_j^*}{(i+1)(i+2)} \right)$$

Был проведен вычислительный эксперимент по оценке траектории автомобиля, для которой заданы $V_i = [8, 3 \ 0](\text{м/с})$ и $z_{0i} = [20 \ 150](\text{м})$. На рис. 1 и 2 приведена заданная траектория автомобиля (*), локальные первичные оценки траектории (+), а также аппроксимации траектории (O) на основе оценок (2) соответственно для 6 и 12 датчиков (X) сейсмических сигналов.

При малом количестве датчиков ошибка определения координат автомобиля превышает 10 м,

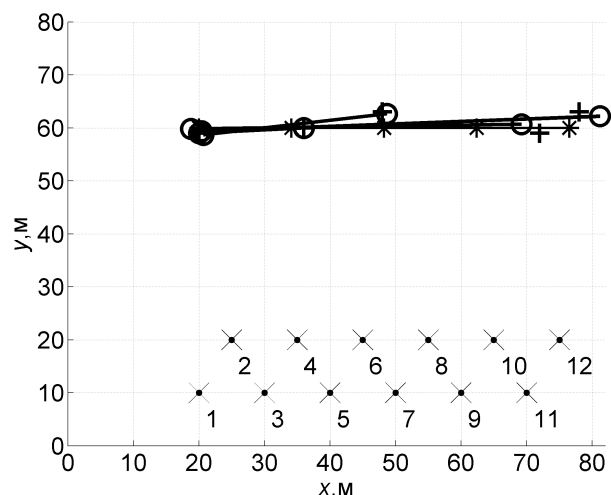


Рисунок 2. Оценка траектории автомобиля в сейсмической системе охраны для 12 датчиков

что особенно заметно в конце траектории (рис. 1). В первую очередь данная ошибка обусловлена неправильным определением скорости автомобиля. При большом количестве датчиков, расположенных вдоль всей траектории автомобиля, скорость автомобиля определяется точнее и ошибка составляет не более 5 м. Наибольшая ошибка наблюдается для четвертой слева точки траектории, а для остальных точек оценки координат почти совпадают с ожидаемыми (рис. 2) для $\bar{U}_{kj} / \sigma_{kj} = 7$.

Выводы

Результаты проведенного эксперимента подтверждают эффективность предложенного метода оценки траектории автомобиля. Полученные оценки параметров траектории движения автомобиля соответствуют их ожидаемым значениям при достаточно большом количестве сейсмических датчиков. Полученные результаты дают основание для дальнейших исследований методов массивной локации на основе измерений средней мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мархакшинов А. Л., Спектор А. А. Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. № 5. С. 48–53.
2. Филатова С. Г. Точность оценки временного положения сейсмического сигнала в системах охранного наблюдения // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 73–80.
3. Райфельд М. А. Алгоритм классификации «одиночный человек / группа людей» в сейсмической системе наблюдения // Научный вестник НГТУ. 2012. № 1. С. 170–174.
4. Амплитудно-угломерный метод нестационарной пассивной локации с учетом частично известных параметров движения цели / Ю. Г. Булычев, В. Ю. Булычев, С. С. Ивакина, И. Г. Насенков // Автометрия. 2015. № 3. С. 70–79.
5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1969. Т. 1. 752 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Спектор Александр Аншелевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-13-78, e-mail: spectoraa@mail.ru.

Морозов Юрий Владимирович, к.т.н., доцент, кафедра теоретических основ радиотехники, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-13-78, e-mail: sibfrost24@mail.ru.

For citation: Spektor A. A., Morozov Yu. V. Vehicle motion parameters estimation in passive seismic location. Voprosy radioelektroniki, 2017, no. 4, pp. 99–101.

A. A. Spektor, Yu. V. Morozov

VEHICLE MOTION PARAMETERS ESTIMATION IN PASSIVE SEISMIC LOCATION

The paper proposes the method of vehicle trajectory estimation based on seismic signal power characteristics. The method is based on maximum likelihood estimations of vehicle initial position and velocity vector. The simulation for vehicle seismic signals has approved reliability of such estimations.

Keywords: seismic guard system, maximum likelihood, signal strength.

REFERENCES

1. Markhakshinov A. L., Spektor A. A. Target motion local characteristics estimation in a seismic guard system. *Avtometriya*, 2009, no. 5, pp. 48–53 (In Russian).
2. Filatova S. G. Seismic signal time position detection in seismic guard systems. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, no. 2, pp. 73–80 (In Russian).
3. Raifeld M. A. Single-Group classification algorithm in a seismic guard system. *Nauchnyy Vestnik NGTU*, 2012, no. 1, pp. 170–174 (In Russian).
4. Bulychev Yu. G., Bulychev V. Yu., Ivakina S. S., Nasenkov I. G. Amplitude-angle method of non-stationary passive location with respect to partially known target motion parameters. *Avtometriya*, 2015, no. 3, pp. 70–79 (In Russian).
5. Levin B. R. *Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio, 1969, vol. 1, 752 p. (In Russian).

AUTHORS

Spektor Aleksandr, Dr., professor, head of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering Department, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-13-78, e-mail: spectoraa@mail.ru.

Morozov Yuriy, PhD, assistant professor, Theoretical Fundamentals of Radio Engineering Department, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-13-78, e-mail: sibfrost24@mail.ru.