

Д. Д. Лаврентьев^{1✉}, М. С. Хайретдинов², О. А. Копылова²

Частотно-векторные характеристики транспортных колебаний в разных рабочих режимах

¹Новосибирский Государственный Технический Университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения
РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: danil-lavrentev-2000@mail.ru

Аннотация. Актуальность задачи обусловлена необходимостью разработки программно-алгоритмических средств пассивной локации транспортных объектов по их сейсмическим колебаниям. Экспериментальные данные получены посредством трехкомпонентных сейсмодатчиков, регистрирующих колебания по взаимортогональным осям X , Y и Z . Выполнена спектрально-временная обработка данных с применением секционирования записей транспортного шума в режимах работы автомобиля марки «Нива» на месте и в движении. Это позволяет выделять последовательность доминантных частот, определяемых числом оборотов основного двигателя. Выделяемые частоты используются в качестве центральных для адаптивной настройки полосового фильтра Баттерворта. Ключевым результатом программной реализации является построение полярограмм по компонентам X - Y на основе отфильтрованных сейсмограмм и последующий расчет азимутального угла α , определяющего пеленг на источник колебаний. Разработанное решение позволяет повысить точность пеленгации транспортных средств сейсмическим методом.

Ключевые слова: спектральный анализ, сейсмограмма, полосовой фильтр Баттерворта, полярограмма, пеленгация, азимутальный угол

D. D. Lavrentev^{1✉}, M. S. Khayretdinov², O. A. Kopylova²

Frequency-vector characteristics of vehicle vibrations in different operating modes

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: danil-lavrentev-2000@mail.ru

Abstract. The relevance of this work stems from the need to develop software and algorithmic tools for the passive location of vehicles based on their seismic vibrations. Experimental data were acquired using three-component seismic sensors that record ground motion along mutually orthogonal X , Y , and Z axes. Time-frequency processing was carried out by segmenting the vehicle noise records obtained from a «Niva» car operating in both stationary and moving modes. This procedure makes it possible to extract a sequence of dominant frequencies determined by the main engines rotational speed. The extracted frequencies are used as center frequencies for the adaptive tuning of a Butterworth bandpass filter. The key outcome of the software implementation is the construction of polar diagrams from the X - Y components using the filtered seismograms, followed by the calculation of the azimuth angle α that gives the bearing to the vibration source. The developed solution improves the accuracy of vehicle direction finding by the seismic method.

Keywords: spectral analysis, seismogram, Butterworth bandpass filter, polarogram, direction finding, azimuth angle

Введение

Проблема геоэкологического мониторинга техногенных шумов, обусловленных возрастающей автомобилизацией, активной строительной и производственной деятельностью, приобретает всё большую актуальность [1]. В связи с этим возникает необходимость в разработке и совершенствовании методов обнаружения и пеленгования источников сейсмических колебаний, в частности, транспортных средств [2]. Одним из современных методов пеленгования является поляризационный, который опирается на трех-координатную взаимоортogonalную регистрацию транспортных сейсмических колебаний в заданной точке. Анализируя параметры получаемого векторного колебания и, прежде всего, ориентацию большой оси эллипса поляризации, можно определять пеленг на источник [4, 5]. Ниже рассматривается задача помехоустойчивой пеленгации на фоне внешних шумов [3] на основе анализа экспериментально записанных сейсмических колебаний, полученных от легкового автомобиля в разных рабочих режимах.

Методы и материалы

Общая постановка задачи пассивной геолокации состоит в следующем. С помощью линейки пространственно-распределенных трехкомпонентных датчиков в земле регистрируется волновое поле, представляемое в виде векторной функции:

$$\bar{A}(x, y, z, t) = \{\bar{A}_k\}[x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)]\}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – множество дискретных значений функций, $k = 1, 2, \dots, M$ – число датчиков в линейке $[x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)]$. Компонента X ориентируется на север, Y – на восток, Z – вертикальная компонента.

Волновое поле от транспортного источника описывается суммой нестационарных квазигармоник и фонового шума с преобладающей спектральной компонентой, соответствующей частоте вращения основного двигателя. Модель данного колебания задается выражением:

$$x_k(t_i) = A_x(k)h_kL[\cos(\omega_0(t_i - \Delta t_k) + \varphi_x(k)) + n_k(t_i)], \quad (2)$$

Здесь A_x – амплитуда колебания по компоненте X на k -ом датчике, ω_0 – преобладающая в спектре колебаний частота вращения двигателя, $\varphi_x(k)$ – фаза ее в k -ой точке регистрации для компоненты X , h_k – чувствительность датчика, L – оператор фильтрации сигнала, $n_k(t)$ – внешний шум с корреляционной функцией $r_k(\tau)$.

Трехмерный вектор сейсмических колебаний (1) с учетом моделей колебаний по компонентам в виде (2) представляется в виде набора точек, пространственное

положение каждой из которых характеризуется радиусом-вектором:

$$\vec{A}_i \equiv (x_i, y_i, z_i),$$

Доминирование основной гармоники позволяет моделировать трёхмерное поле, которое будет описываться эллипсоидом рассеяния с наложенными шумами. Ориентация большой оси эллипсоида, встречная фронту волны, задается азимутальным углом α и тангенциальным углом θ . Точность определения азимута связана со степенью компактности эллипсоида, которая оценивается через производную функции:

$$\Delta a/a \sim \left(1 / \frac{\partial[A(x,y)]}{\partial x \partial y}\right). \quad (3)$$

При движении транспорта доминирующие спектрально-временные составляющие излучаемого сигнала (основная частота) могут изменяться во времени, например: при разгоне, работе на месте, включении и выключении зажигания или торможении. В этих условиях для повышения точности и устойчивости к шумам, необходима процедура отслеживания текущей основной частоты – $\omega_0(t)$ с последующим применением полосовой фильтрации на исследуемом участке движения транспорта. С этой целью на каждом последовательном временном интервале анализа выполняется спектрально-временное оценивание: исходная сейсмограмма сегментируется на окна равной длительности, в пределах каждого окна вычисляется преобразование Фурье и по положению максимума амплитудного спектра определяется текущее значение частоты $\omega(t)$. Полученная частота используется в качестве параметра для установки границ полосового фильтра, что позволяет выделить квазигармоническую составляющую на фоне широкополосных шумов и обеспечить более точный поляризационный анализ. Искомая модель сигнала на каждом временном окне представляется в виде:

$$Z(t) = A(t) \cdot \xi(t), \quad (4)$$

где $\xi(t)$ – непрерывный случайный сигнал, $A(t)$ – импульсная функция. Алгоритм спектрально-временного анализа имеет вид:

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} Z_l(t_n) \exp\left(-i \frac{2\pi n k}{N}\right), l = 1, \dots, L. \quad (5)$$

Здесь $T = N \cdot \Delta t$ – длительность секции, L – число секций длительностью T каждая.

Для улучшения точности пеленгования источника на этапе предобработки применяется цифровая фильтрация на основе оператора L , обеспечивающего подавление шумовой составляющей и извлечение полезного сигнала. В качестве оператора L используется передаточная функция полосового фильтра Баттерворта:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}, \quad (6)$$

где ω_0 – граничная частота, n – порядок фильтра.

Параметры фильтрации настраивались в соответствии с диапазоном, в котором выделяемая частота соответствовала характерным частотам моменту работы на месте. Предварительно был осуществлён спектральный анализ экспериментальных записей движения автомобиля марки «Нива» в режимах работы на месте и в движении, сейсмограммы записывались с 4-х датчиков, на которых фиксировались x , y , z – компоненты.

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} x_l(t_n) e^{-i \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (7)$$

где $x_l(t_n)$ – анализируемый сигнал в рамках временного окна l , где $l = 1, \dots, L$ – количество временных окон, N – количество временных отсчетов в окне. Данный тип анализа позволяет изучать изменение частоты во времени в задаваемых временных диапазонах.

Результаты

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма был проведён эксперимент с использованием трёхкомпонентной сейсмической регистрации. Сейсмодатчики фиксировали колебания, создаваемые движущимся автомобилем марки «Нива», по трём компонентам X , Y и Z . Пространственная схема размещения датчиков относительно траектории движения транспортного средства (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения датчиков

По результатам эксперимента был записан профиль скорости движения автомобиля, отражающий изменение скорости на всём маршруте, участки остановок и полный пройденный путь (рис. 2).

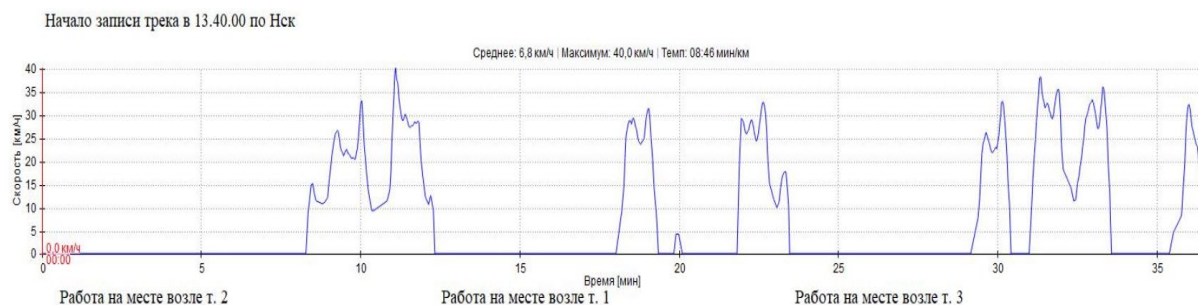


Рис. 2. Трек движения автомобиля

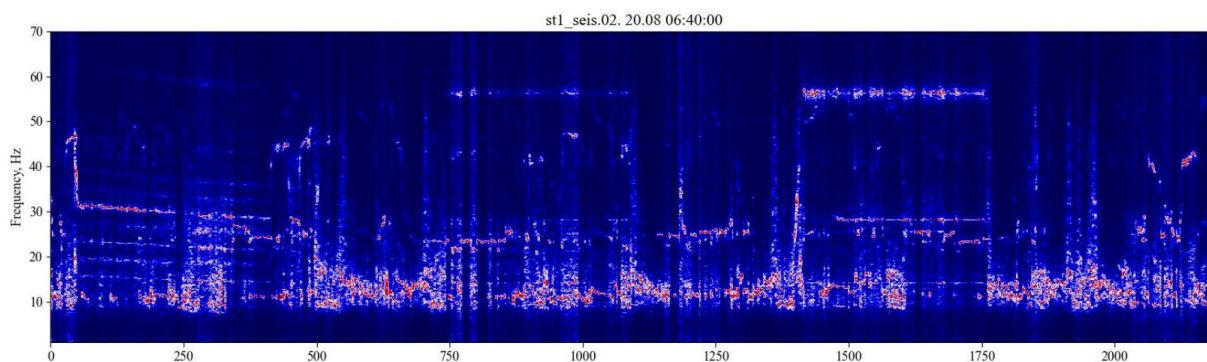


Рис.3. Спектрограмма движения автомобиля

Зарегистрированные сейсмические сигналы загружались в разработанный программный комплекс и подвергались анализу, как на интервалах работы автомобиля на месте с включённым двигателем, так и на участках с постоянным движением. Для каждого анализируемого временного интервала выполнялся спектральный анализ (рис. 4), по результатам которого определялась модальная частота с максимальной амплитудой, соответствующая числу оборотов двигателя: рис. 4.а – спектр работы автомобиля на месте на участке 340-360 с, рис. 4 б – Спектр движения автомобиля на участке 180-240 с. Эти частоты используются в качестве центральных для полосового фильтра Баттерворта, через который пропускались исходные сейсмограммы.

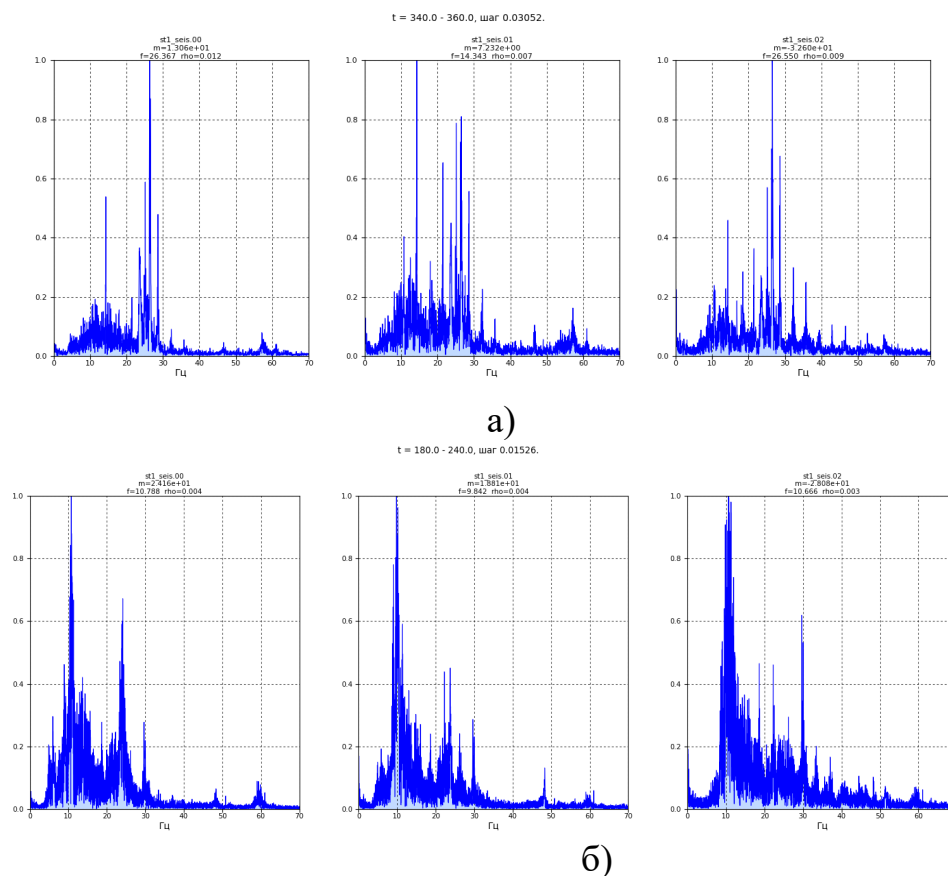


Рис. 4. а) Спектр работы автомобиля на месте на участке 340-360 с
 б) Спектр движения автомобиля на участке 180-240 с

Анализ спектрограмм, полученных для различных режимов функционирования транспортного средства, позволил дифференцировать основные источники шума. В режиме работы на месте доминирующая спектральная составляющая изменялась в диапазоне от 26 до 29 Гц в зависимости от оборотов двигателя. Проведя соотношение спектров с модальной частотой 29 Гц со значениями оборотов в минуту на спидометре, авторы данной работы предположили, что данная частота соответствует моменту работы на месте на оборотах 870 об/мин. При переходе к постоянному движению спектральный состав шума претерпевает существенные изменения, расширяясь в диапазоне от 10 Гц до 45 Гц с разной интенсивностью. Данные частотные компоненты характеризуются преимущественно элементами ходовой части и подвески, а также являются следствием аэродинамического шума и шума шин. Выделяемая основная частота 45 Гц для интервала движения автомобиля соответствует моменту работы на месте при 1344 об/мин.

На основе отфильтрованных в узкой полосе частот сигналов для компонент X и Y строились полярограммы, по которым рассчитывались азимутальные углы α , определяющие направление на источник колебаний [1]. Полярограммы, построенные по прошедшим полосовую фильтрацию данным для 4-х датчиков, иллюстрируется на рис. 5.

Результаты работы поляризационного анализа приведены в таблице 1. Для

выбранного интервала приведены четыре значения – азимутальный угол по исходной полярограмме α_1 и азимутальный угол после полосовой фильтрации α_2 .

Таблица 1

$T(c)$	№ Датчика	α_1	α_2
300-301	st1	33.5°	141.7°
	st2	26.6°	53.3°
	st3	58.8°	149.2°
	st4	2.1°	86.7°

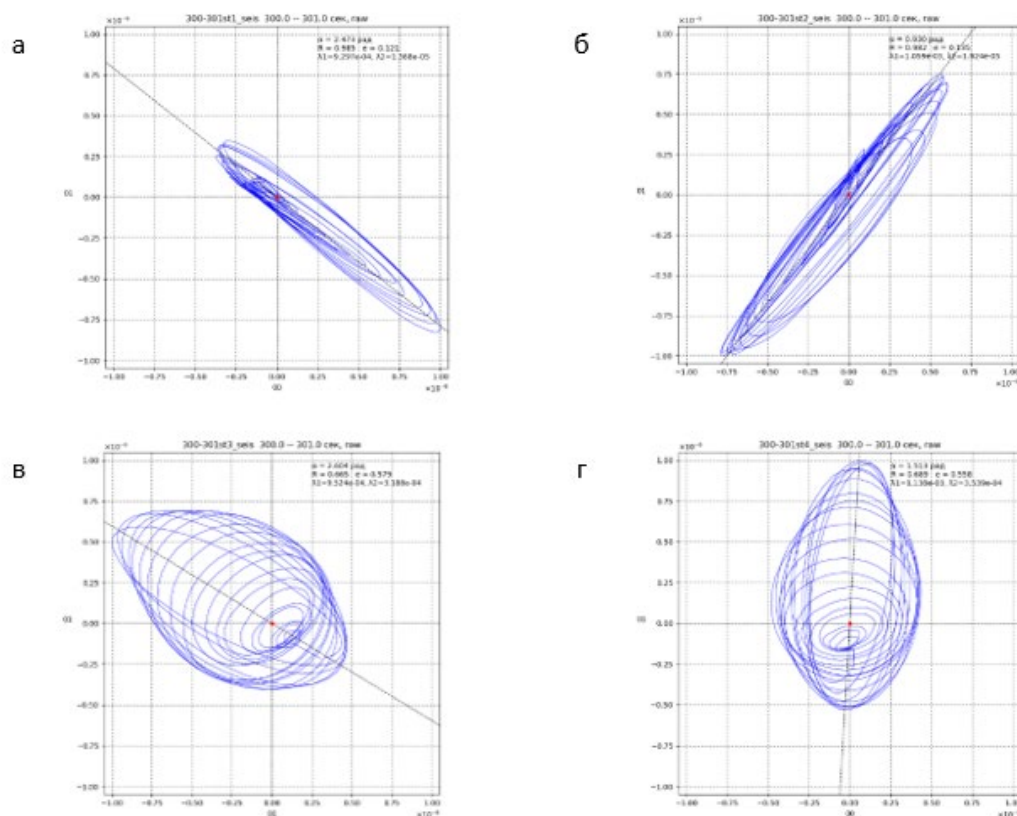


Рис. 5. Полярограммы режима работы на месте в окне 1 секунда с полосовой фильтрацией в интервале 25-27 Гц для датчиков:
а) st1; б) st2; в) st3; г) st4

Обсуждение

Узкополосная фильтрация с выбором модальной частоты в качестве центральной, соответствующей числу оборотов двигателя, позволяет выделить когерентную составляющую транспортного колебания, что позволяет улучшить точность определения азимутального угла и снизить погрешность пеленгации.

Заключение

В ходе работы выполнено исследование частотно-векторных характеристик сейсмических колебаний, генерируемых автомобилем в стационарном режиме и

в процессе движения. Разработан и апробирован в натурных условиях алгоритм адаптивной полосовой фильтрации с поляризационным анализом, позволяющий по данным одиночной трёхкомпонентной станции определять азимут на источник.

Спектральный анализ позволил выявить принципиальные различия в частотном составе сигналов для разных режимов работы транспортного средства. Показано, что настройка фильтра на модальную частоту двигателя обеспечивает выделение когерентной составляющей и формирование устойчивых полярограмм, для расчета пеленга на источник. Полученные результаты демонстрируют эффективность спектрально-поляризационного подхода для решения задач пассивной локализации транспортных объектов по их вибрационному фону.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNN-2025-0004

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доброродный В. И., Копылова О. А., Хайретдинов М. С. Обнаружение и пеленгование транспортных объектов в сейсмоакустических системах наблюдения // Вестник СибГУТИ. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 3–17.
2. Алямкина С. А., Нежевенко Е. С. Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 31–39.
3. Коваленко А. О., Кузичкин О. Р., Суржик Д. И., Быков А. А. Фильтрация и обработка сейсмических сигналов движения транспортных объектов. // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП–2020) : сб. материалов VIII Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 24–25 сент. 2020 г. – Белгород, 2020. – С. 291–294.
4. Yuan S., Bernauer F., Wassermann J., Martin E. R., Igel H. Single-station vehicle tracking using six-component seismic measurements: A comparative study with array-based methods // Seismica. – 2025. – V. 4. No. 2. – DOI: 10.26443/seismica.v4i2.1500.
5. Кулеш М. А. Мгновенные поляризационные свойства трехкомпонентных сигналов в базисе вейвлетов // Вестник Самарского государственного университета. Естественная серия. – 2008. – № 2 (61). – С. 182–194.

© Д. Д. Лаврентьев, М. С. Хайретдинов, О. А. Копылова, 2026