

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

Адаптивная квадратурная фильтрация транспортных колебаний в задачах геолокации

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

²Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kreknin98@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается проблема геоэкологического мониторинга окружающих техногенных шумов в связи с их возрастающим воздействием на социальную среду. В связи с обозначенной проблемой возникают задачи обнаружения и определения местоположения источников шумов. Для решения задач с повышенной точностью разработаны и исследованы алгоритм и программа обнаружения и определения местоположения источника на основе помехоустойчивой адаптивной квадратурной фильтрации транспортных колебаний на фоне окружающих шумов и вычисления фазовых характеристик колебаний на текущих секционированных участках входных сигналов с последующим вычислением трёхмерного вектора фаз. По получаемым текущим реализациям векторов фаз определяется азимутальное направление на источники. Выполнены численное моделирование и экспериментальное исследование предложенного подхода по оцениванию точности пеленгации.

Ключевые слова: транспортные шумы, пассивный геомониторинг, сейсмоакустические колебания, спектрально-временной анализ, квадратурная фильтрация, геолокация

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

Adaptive quadrature filtering of transport vibrations in geolocation tasks

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: kreknin98@gmail.com

Abstract. The paper considers the problem of geoecological monitoring of the surrounding man-made noises in connection with their increasing impact on the social environment. In connection with this problem, the tasks of detecting and locating noise sources arise. To solve problems with increased accuracy, an algorithm and a program for detecting and locating a source based on noise-resistant adaptive quadrature filtration of transport vibrations against ambient noise and calculating the phase characteristics of vibrations in the current sectioned sections of input signals with subsequent calculation of a three-dimensional phase vector have been developed and investigated. According to the current phase vector implementations obtained, the azimuthal direction to the sources is determined. Numerical modeling and experimental investigation of the proposed approach to estimating the accuracy of direction finding have been performed.

Keywords: transport noise, passive geomonitoring, seismic and acoustic vibrations, spectral and temporal analysis, quadrature filtering, geolocation

Введение

Проблема геоэкологического мониторинга окружающих техногенных шумов в связи с их возрастающим воздействием на социальную среду приобретает все более высокую актуальность. Этому способствуют рост автомобилизации в мире, ведение активных работ по строительству, производственная деятельность, а также проведение различных промышленных и карьерных взрывов.

Одними из основных в этой области являются задачи, связанные с обнаружением транспортных колебаний на фоне внешних шумов с последующим определением азимутального направления (пеленга) на источники сейсмоакустических колебаний. С этим связаны понятия фазовых фронтов волн и подобия сигналов, передающих информацию о лоцируемом источнике в многоканальные пространственно-распределенные системы регистрации. Подобие сигналов при этом оценивается функцией когерентности сигналов на выходах датчиков. В частности, на этих принципах базируется подход к определению пеленга на активные источники по их преобладающим спектральным составляющим шумов [1].

Другой подход к решению рассматриваемой задачи связан с теорией корреляционно-экстремальных систем (КЭС) [2], в основе которых лежит вычисление функции взаимной корреляции случайных процессов и определения координат главного экстремума этой функции, характеризующих положение лоцируемого источника. В качестве исходных при этом могут быть использованы волновые поля разной физической природы. Решение задачи предложены и в ряде других работ [3-7].

Методы и материалы

В качестве основного инструмента повышения точности авторами данной работы предлагается применение цифровой адаптивной квадратурной фильтрации полезных транспортных колебаний на фоне мешающих шумов. Процесс адаптации предполагает слежение за текущими частотными характеристиками колебаний, которые определяется режимами движения транспортного средства. Такой подход к выделению полезных транспортных колебаний на фоне шумов и определения текущих фазовых характеристик с использованием в последующем поляризационного метода построения трёхмерного эллипсоида позволяет повысить точность пеленгации подвижного источника с применением способа определения положения большой оси эллипсоида.

Рассмотрим алгоритм квадратурного накопления, используемый для выделения гармонических сигналов и измерения их параметров на фоне помех. Результат работы алгоритма квадратурного накопления состоит в получении значений амплитуды R и фазы φ гармонического сигнала [8]. Преимущество данного алгоритма перед другими алгоритмами состоит в том, что он может обрабатывать входные данные в поточном режиме реального времени.

Проанализируем математический аппарат, на основе которого построен алгоритм квадратурного накопления. Для этого представим регистрируемый сигнал в виде

$$Z_j(t) = S_j(t) + n_j(t), \quad (1)$$

где $S_j(t) = A_m \sin(\omega_0 t + \varphi_{cj})$ - входной сигнал с амплитудой A_m и начальной фазой колебаний φ_c , подлежащими оцениванию, $n_j(t)$ - шум, $j=1, 2 \dots$ - число каналов регистрации. Если предположить, что φ равномерно распределяется в пределах $[0, 2\pi]$, а $n(t)$ - стационарный шум, то оптимальный алгоритм накопления полезного сигнала определяется статистикой вида

$$R(A, \varphi) = \sqrt{X^2(A, \varphi) + Y^2(A, \varphi)}, \quad (2)$$

здесь X и Y - квадратурные компоненты оптимального накопителя. В случае гармонического опорного сигнала с частотой ω_0

$$X(A, \varphi) = \int_0^T X(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$$Y(A, \varphi) = \int_0^T X(t) \cos(\omega_0 t) dt \quad (4)$$

Подставляя (1) в (3) и (4) и, проводя несложные вычисления, получим средние значения статистик случайных величин X и Y с точностью до постоянного множителя

$$\bar{X}(A, \varphi) \approx A_m T \cos \varphi_c \quad (5)$$

$$\bar{Y}(A, \varphi) \approx A_m T \sin \varphi_c \quad (6)$$

Тогда

$$R(A) \approx A_m T \quad (7)$$

Чтобы исключить зависимость выходной статистики R от T , необходимо в (3) и (4) выполнить интегрирование со взвешиванием вида $1/T \int_0^T$. Таким образом, выходная статистика будет пропорциональна амплитуде выходного сигнала A_m . Структура многоканального устройства накопления для этого случая представлена на рисунке 1. Из формул (5) и (6) видно, что искомая начальная фаза входного сигнала φ может быть определена в виде

$$\varphi_c = \text{arctg} \frac{\bar{Y}(A, \varphi)}{\bar{X}(A, \varphi)} \quad (8)$$

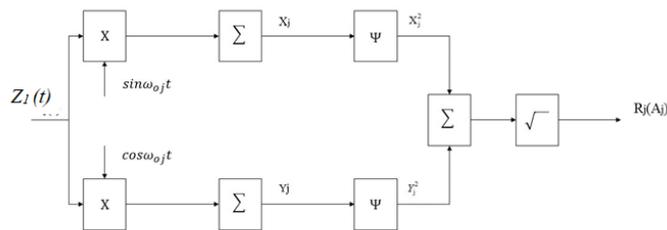


Рис. 1. – Структура 1-го канала устройства накопления гармонического сигнала на фоне помех [8]

Для использования данного алгоритма в персональных компьютерах процедура вычисления квадратур X и Y в цифровом виде может быть представлена рекуррентными соотношениями

$$X[n] = X[n-1] + \gamma(Z[n] - X[n-1]) \quad (9)$$

$$Y[n] = Y[n-1] + \gamma(Z[n] - Y[n-1]) \quad (10)$$

Здесь n - номер текущего дискретного отсчета входного сигнала $Z(t)$, γ - параметр сходимости вычисляемой статистики к оценке параметра амплитуды, определяемый в виде $\gamma = \Delta t / T$, где Δt – интервал дискретизации, T – длительность обрабатываемой реализации сигнала.

При движении объекта могут изменяться доминирующие частоты излучаемого сигнала (основные частоты, связанные с числом оборотов двигателя при разгоне автомобиля), поэтому для таких задач необходима процедура слежения за текущей основной частотой ω_0 для повышения помехоустойчивости оценивания параметров (2), (8). Для этого необходимо на каждом некотором текущем временном интервале определять ω_0 и в последующем использовать ее в качестве опорной в квадратурном фильтре (рис.1). Такая процедура может быть выполнена с использованием спектрально-временного анализа. Такой анализ предполагает, что исходный сигнал “разрезается” на временные окна равной длительности, на каждом окне проводится преобразование Фурье и определяется доминирующая (основная) частота. Это позволяет оценить эволюцию спектра во времени, оценивая при этом по максимуму спектра основную частоту в каждом временном окне. Искомая модель сигнала представляется в виде:

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

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

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

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

Результаты

Для проверки работоспособности алгоритма был проведён модельный эксперимент. Использовалась двухканальная схема обработки вида, представленного на рис.1. В качестве входных сигналов для каждого из каналов были сгенерированы смеси синусоидальных сигналов с шумом: $Z_{1,2}(t) = S(t) + n_{1,2}(t)$. Далее сигналы $Z_{1,2}$ “разрезаются” на временные окна равной длительности T , в каждом окне проводится преобразование Фурье и определяется доминирующая частота ω_0 , далее эта частота передаётся в квадратурный алгоритм как опорная частота. В результате работы квадратурного алгоритма вычисляются параметры R и φ в текущем временном окне. На основе вычисляемых множества параметров φ строится векторная диаграмма (полярграмма) в координатах φ_1, φ_2 . По полученной полярграмме рассчитывается азимутальный угол α , определяющий направление на источник колебания согласно [9].

Работа алгоритма проверялась при изменении двух параметров: размера окна накопления T (с), уровня шума n (%). Результаты работы алгоритма приведены в таблице 1. Для каждого случая приведены четыре значения – азимутальный угол по исходной полярграмме (α_1), азимутальный угол по вычисляемой полярграмме (α_2) и относительные погрешности для двух случаев соответственно (δ_1, δ_2). В данной модели истинное значение азимутального угла составляет 45° .

Таблица 1

$T \backslash n$	0%	33%	66%	100%
1с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 40.45^\circ$ $\alpha_2 = 44.78^\circ$ $\delta_1 = -10.11\%$ $\delta_2 = -0.49\%$	$\alpha_1 = 55.87^\circ$ $\alpha_2 = 45.43^\circ$ $\delta_1 = 24.15\%$ $\delta_2 = 0.97\%$	$\alpha_1 = 75.44^\circ$ $\alpha_2 = 44.94^\circ$ $\delta_1 = 67.65\%$ $\delta_2 = -0.13\%$
2с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 52.21^\circ$ $\alpha_2 = 45.2^\circ$ $\delta_1 = 16.02\%$ $\delta_2 = 0.45\%$	$\alpha_1 = 65.53^\circ$ $\alpha_2 = 45.28^\circ$ $\delta_1 = 45.61\%$ $\delta_2 = 0.62\%$	$\alpha_1 = 77.96^\circ$ $\alpha_2 = 45.05^\circ$ $\delta_1 = 73.24\%$ $\delta_2 = 0.1\%$
4с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 35.73^\circ$ $\alpha_2 = 45.15^\circ$ $\delta_1 = -20.6\%$ $\delta_2 = 0.34\%$	$\alpha_1 = 24.99^\circ$ $\alpha_2 = 45.43^\circ$ $\delta_1 = -44.48\%$ $\delta_2 = 0.96\%$	$\alpha_1 = 83.03^\circ$ $\alpha_2 = 45.11^\circ$ $\delta_1 = 84.52\%$ $\delta_2 = 0.25\%$

Для решения задачи пеленгования движущихся транспортных источников проведён модельный эксперимент с применением в качестве исходного сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнала), имитирующего сигнал разго-

няющегося грузовика. На рисунке 2 отображено начало сигнала на 10с. Это соответствует разгону автомобиля от 0 км/ч до 45 км/ч за следующие 20с. Работа алгоритма проверялась при изменении двух параметров: размера окна накопления T (с), уровня шума n (%).

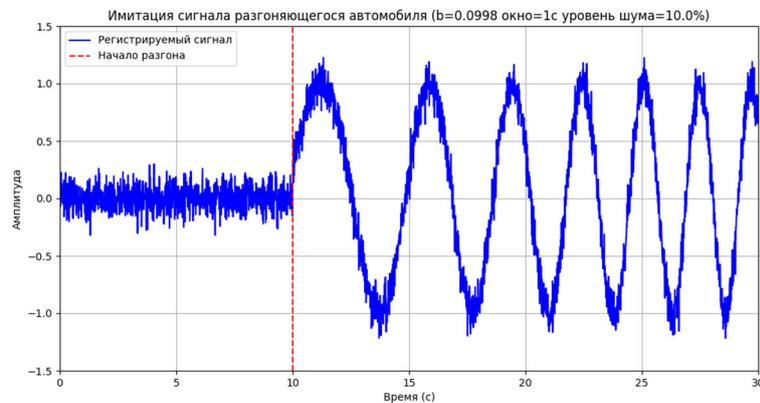


Рис. 2. Модельный сигнал при $T = 1$ с, $n = 10\%$

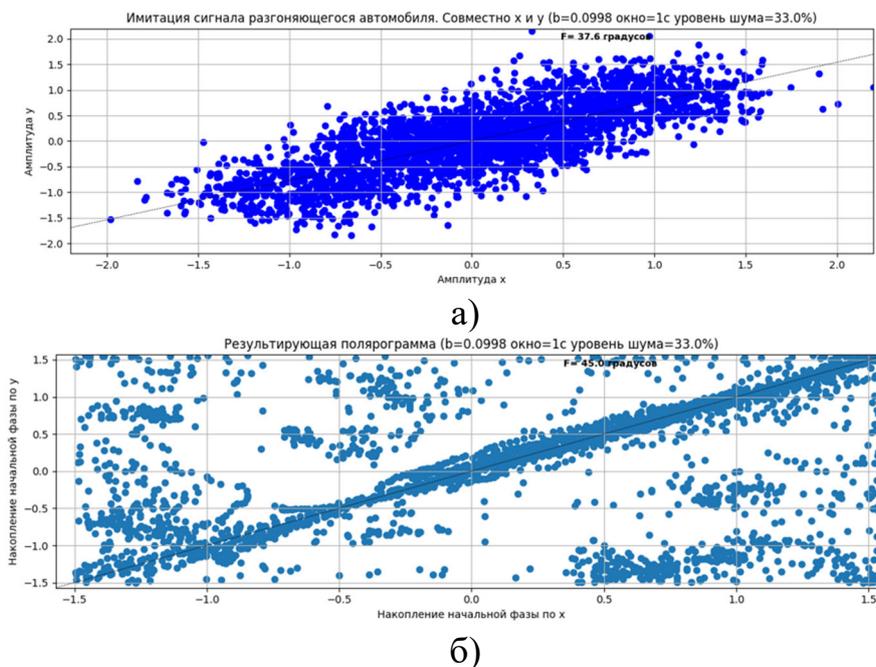


Рис. 3.а) – полярограмма входного сигнала с шумом при $T = 1$ с, $n = 33\%$;
 б) – вычисленная полярограмма для того же сигнала при $T = 1$ с, $n = 33\%$

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 2. Для каждого случая набора в виде размера временного окна (T) и уровня шума (n) приведены четыре значения – азимутальный угол по исходной полярограмме (α_1), азимутальный угол по вычисляемой полярограмме (α_2) и относительные погрешности для двух случаев соответственно (δ_1, δ_2). В данной модели истинное значение азимутального угла составляет 45° .

Таблица 2

$T \backslash n$	0%	33%	66%	100%
1с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 39.4^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = -12.42\%$ $\delta_2 = 0.21\%$	$\alpha_1 = 33.5^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = -25.53\%$ $\delta_2 = 0.11\%$	$\alpha_1 = 61.6^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = 36.84\%$ $\delta_2 = 0.28\%$
2с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 47.0^\circ$ $\alpha_2 = 44.9^\circ$ $\delta_1 = 4.42\%$ $\delta_2 = -0.28\%$	$\alpha_1 = 32.2^\circ$ $\alpha_2 = 45.0^\circ$ $\delta_1 = -28.51\%$ $\delta_2 = 0.11\%$	$\alpha_1 = 11.0^\circ$ $\alpha_2 = 45.2^\circ$ $\delta_1 = -75.52\%$ $\delta_2 = 0.34\%$
4с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 30.9^\circ$ $\alpha_2 = 45.0^\circ$ $\delta_1 = -31.41\%$ $\delta_2 = 0.01\%$	$\alpha_1 = 36.3^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = -19.41\%$ $\delta_2 = 0.22\%$	$\alpha_1 = 30.7^\circ$ $\alpha_2 = 45.2^\circ$ $\delta_1 = -31.77\%$ $\delta_2 = 0.54\%$

Обсуждение

На основе проведения модельных экспериментов, связанных с изучением эффективности адаптивной квадратурной фильтрации в задачах повышения точности пеленгации транспортных объектов выполнены численные эксперименты с применением моделей сигналов. На модели смеси гармонического сигнала с шумом были получены следующие результаты: относительная погрешность оценивания азимутального угла по вычисляемой полярограмме в диапазоне уровней шумов от 0% до 100% и временных интервалов накопления от 1с до 4с не превысила 1%. В то же время погрешность оценивания азимутального угла по исходной полярограмме варьируется от 0% до 85%. На модели сигнала, имитирующем разгоняющийся автомобиль, были получены следующие результаты: относительная погрешность азимутального угла по вычисляемой полярограмме в диапазоне уровней шумов от 0% до 100% и временных интервалов накопления от 1с до 4с не превысила 1%. В то же время погрешность по исходной полярограмме варьируется от 0% до 75%. Таким образом, с ростом уровня шума и увеличением размера окна накопления точность падает точность также падает до 1%.

Заключение

В ходе работы был разработан и проверен на модельных экспериментах подход к решению задачи пеленгации подвижного транспортного объекта с помощью квадратурной адаптивной фильтрации и применением метода спектрально-поляризационной обработки. Реализация метода связана с решением последовательных задач выделения информативных частот, построением поляризационных эллипсов в координатах регистрирующего датчика с последующим расчетом пеленга на источник. Показана высокая точность пеленгования данным способом.

Эффективность созданных программно-алгоритмических средств доказана при проведении модельных экспериментов с подвижными объектами. В частности, показано что достигнутая относительная погрешность пеленгации движущегося источника с помощью поляризационного метода составляет до 1%.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карлтон П. Н., Фидлер Р. У. Определение положения источника сейсмических колебаний методом пассивного эксперимента. В кн. «Анализ и выделение сейсмических сигналов». - М.: «Мир», 1986. - С.158-175.
2. Странгуль О. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы навигации и локации подвижных объектов // Автоматика и телемеханика, № 7, 2001.- С. 201–210.
3. Алямкин С. А., Нежевенко Е. С. Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика, № 2, 2014. - С. 31–39.
4. Аверьянов А. В., Глебова Г. М. Определение координат движущегося объекта сосредоточенной системой наблюдения. Автометрия. 2014. 50, №4. - С.67-73
5. Морозов Ю. В., Райфельд М. А., Спектор А. А. Обработка сейсмических сигналов для оценки траектории движущегося транспортного средства // Автометрия, № 3, 2018. - С. 32-38.
6. Sankaranayanan A. C., Zheng.Q., Chelappa R, et al. Vehicle tracking using acoustic and video sensors // Proc. of the 24th Army Science Conference. Orlando, USA, Nov.-Dec., 2004. ADM001736
7. Хайретдинов М. С., Геза Н. И., Ковалевский В. В. [и др.] Технология вибросейсмической нанометрии в проблеме активного мониторинга. Вестник НЯЦ РК. - 2012. – Вып. 2(50). - С.48-54.
8. Дворецкая, Л. Программно-технические средства обработки вибросейсмических сигналов и анализа миросейсм / Л. Г. Дворецкая, Ю. И. Родионов, М. С. Хайретдинов. – Издательство ВЦ СО РАН. – препринт. – Новосибирск, 1993. – 41 с.
9. Доброродный В. И., Копылова О. А., Хайретдинов М. С. Обнаружение и пеленгование транспортных объектов в сейсмоакустических системах наблюдения // Вестник СибГУТИ. 2023. Том 17, № 1. - С. 3–17

© А. О. Крекнин, М. С. Хайретдинов, О. А. Копылова, 2025