Акустическое и сейсмическое поле движущихся источников шума и вибрации (регистрация решеткой микрофонов и сейсмической косой)

Ю. М. Заславский, * В. Ю. Заславский, А. М. Соков Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН) Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова д. 46 (Статья поступила 10.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Выполнен многоканальный прием акустических и сейсмических сигналов, порождаемых легковым автомобилем, быстро движущимся по автостраде. Внешний акустический шум и техногенные сейсмические сигналы зарегистрированы продольной антенной микрофонов и косой сейсмоприемников. На основе фазовой перестройки в спектрах регистрируемых акустических сигналов (при их обработке) построены веерные диаграммы, указывающие текущее направление на движущийся объект. Для контроля его скорости используется тонкий спектральный анализ и доплеровское смещение частот дискретных компонент в спектре внешнего шума. По результатам регистрации сигналов на косу сейсмических приемников построена картина поля, на которой формируются волновые годографы, по линиям которых обеспечивается прогноз направления движения объекта и оценка его скорости, используемая для верификации данных акустической регистрации, а также возможно получение информативных признаков, необходимых для его классификации.

РАСS: 43.50.+у УДК: 539.3 Ключевые слова: внешний акустический шум, сейсмические колебания, движущийся легковой автомобиль.

введение

В связи с нарастающей плотностью средств транспорта в мегаполисах все большую актуальность приобретает проблема удаленного контроля или мониторинга транспортного движения, в частности, такого его распространенного вида как легковой автомобиль. Мониторинг может выполняться на основе регистрации и анализа собственного внешнего акустического поля. Для этой цели также могут использоваться сейсмические волны, поскольку наземный транспорт одновременно является источником техногенных колебаний грунта. Эти волны техногенного происхождения, возбуждаемые вблизи земной поверхности, повседневно проявляющиеся на практике в виде сотрясания жилых зданий и сооружений, преобладают на частотах 1,..., 100 Гц.

Представляет интерес рассмотреть возможность удаленного контроля параметров движения на примере автомобиля при его прохождении вдоль шоссейной трассы, основываясь на использовании специфических изменений в пространственно–угловом распределении создаваемых им воздушно-акустических и сейсмических полей. При этом картина текущего пространственного распределения интенсивности внешнего акустического шумового поля создается на основе азимутальной веерной диаграммы, формируемой при многоканальном антенном приеме. Аналогично этому в картине сейсмического волнового поля, формируемого при регистрации колебаний многоканальной косой сейсмоприемников, также содержатся информативные характеристики, позволяющие идентифицировать объекты и контролировать параметры движения на основе специфического вида линий-годографов.

1. УСЛОВИЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Натурные эксперименты по регистрации акустического шума, а также сейсмических сигналов создаваемых легковым автомобилем, быстро движущимся по прямолинейному участку асфальтированной трассы со скоростями до ~ 100 км/час, выполнены в летних безветренных погодных условиях. Колебания грунта вертикальной поляризации (*z*-ориентации) регистрируются на сейсмическую косу стандартного многоканального комплекса инженерной геофизической разведки Lokalit (общей длиной апертуры 11.5 м), в которой используются 24 датчика, установленных в линию с шагом $d_{\text{seis}} = 0.5$ м на земной поверхности параллельно трассе на обочине с отступом от кромки на 1.2 м [1]. В акустических измерениях используется одноплечая приемная антенна — продольная решетка микрофонов, установленная на обочине (у края дорожного полотна на расстоянии 5-7 м от его оси), при этом схема регистрации шума аналогична описанной в работе [2]. Решетка из K = 32 микрофонов располагается в нескольких см по высоте над травяным покровом и ориентирована параллельно движению. При расстановке микрофонов в апертуре продольной антенны соблюдается шаг дискретизации $d_{\rm ac} = 0.1$ м (электретные микрофоны Panasonic WM-61a с рабочей полосой, перекрывающей диапазон звуковых частот (50-16)×10³ Гц).

2. СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА АВТОМОБИЛЯ

Рассмотрим амплитудный спектр внешнего акустического шума движущегося автомобиля, зарегистрированного одним из микрофонов антенны.

^{*}E-mail: zaslav@appl.sci-nnov.ru

В спектре шума на рис. 1,а присутствует преобладающая по уровню дискретная компонента, на частоте $f'_1 \approx 123 \, \Gamma$ ц, которая представляет собой основную гармонику (на частоте выпуска) в спектре выхлопного шума двигателя. Оценки, учитывающие доплеровское смещение, т.е. полученные пересчетом к системе, связанной с источником — автомобилем, показывают, что истинное значение ее частоты составляет $f_1 \approx 115 \, \Gamma$ ц. На рис. 1,6 (на участке удаления) в спектре шума присутствует дискретная компонента, но уже на частоте $f''_1 \approx 107 \, \Gamma$ ц, а также и две более высокочастотные дискретные компоненты, которые, также принадлежат к ряду моторных частот — выхлопа двигателя $f_4 \approx 491$ Гц, $f_5 \approx 614$ Гц. Именно компонента на частотах $f_1' \approx 123$ Гц и $\tilde{f}_1 \approx 115$ Гц в спектрах сигнала, регистрируемого перед достижением траверза, а затем после его прохода, позволяет с использованием соотношения $V = c\Delta f/f_1 \Delta f = (f'_1 - f''_1)/2,$ $ilde{f}_1 = (f_1' + f_1'')/2$ оценить скорость движения объекта V. Учитывая $\Delta f \approx 7.8$ Гц, $\tilde{f}_1 \approx 115$ Гц, получаем $V \approx 23 \,\mathrm{m/c} = 82.8 \,\mathrm{km/чac}$. Полученный результат указывает на возможность удаленного контроля скорости движения путем тонкого спектрального анализа дискретных компонент внешнего акустического шума автомобиля.



Рис. 1: Спектрограмма шума при движении автомобиля по шоссе (по вертикальной оси относительные единицы): *а* — приближение, *б* — удаление

3. ПРОСТРАНСТВЕННО-УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

Для исследования возможности пеленга автомобиля, движущегося по шоссе, построены веерные диаграммы углового распределения интенсивности шума, для чего проведена специальная обработка реализаций шума, зарегистрированных микрофонами продольной антенны. На рис. 2, а, б, в, г, д представлены иллюстрации веерных диаграмм, максимум центрального лепестка которых показывает текущее направление на объект для нескольких реализаций шума, зарегистрированного антенной, соответствующих его движению сначала по одну сторону от траверза, а затем по другую, причем относительно линии траверза оказываются охваченными углы $-30^{\circ} \ldots + 30^{\circ}$. На углах вне этого сектора уровень полезного сигнала сравнивается с уровнем фона или становится ниже него. При анализе вся выборка с полной длительностью реализации шума T = 5 с разбивается на N = 10 элементарных интервалов (конец одного совпадает с началом другого), так что каждый *n*-й элементарный интервал времени составляет ~ 0.5 с.

Веерные диаграммы построены для вышеуказанных элементарных временных интервалов путем применения стандартного алгоритма сканирования центрального лепестка диаграммы направленности приемной антенны. Алгоритм основан на прибавке к фазе каждой спектральной компоненты Фурье-разложения сигнала, принятого любым элементом антенны, фазового набега, определяемого межэлементным расстоянием в решетке и соответствующего некоторому значению угла сканирования максимума центрального лепестка характеристики направленности решетки [3].

4. СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ АВТОМОБИЛЯ

По результатам обработки экспериментально зарегистрированных сейсмических сигналов установлено, что частотный спектр на минимальной дистанции до объекта имеет максимум на частоте $\sim 20-40$ Гц, а его рабочая полоса простирается до ~ 160 Гц.

Построение линий годографов на плоскости «номер датчика — время задержки» выполняется с использованием реализаций, принятых группой датчиков, располагающихся последовательно в косе. Проведя линии, соединяющие в соседних реализациях (с 1-го по 24-й номер) точки с идентичной фазой в близких по форме двух или трех цугах, можно сформировать характерные парные волновые годографы. При этом самой причиной образования коротких волновых цугов, излучаемых при равномерном движении автомобиля, является совокупное влияние дисперсии поверхностных волн, волновая интерференция и допплеровское смещение частоты. Практически важной характерной особенностью является присутствие парных годографов, построенных по совокупности реализаций с датчиков последних номеров, в которых два указанных коротких цуга преобладают регулярно. Они имеют между собой временную задержку, соответствующую или связанную со скоростью движения автомобиля. В рассмотренном случае она составляет $\tau \approx 150\,\mathrm{mc.}$ Если принять, что источник генерации как бы «срабатыва-



Рис. 2: Угловая зависимость отклика с акустической приемной антенны для нескольких интервалов времени. Стрелка указывает направление движения автомобиля



Рис. 3: 24-канальная запись откликов с датчиков сейсмической косы. Скорость движения ~ 70 км/час. Штриховые линии 1, 2 — пара характерных сейсмических годографов. Пунктир 4 — годограф сейсмического цуга от вихревого воздушного потока

ет» в моменты, разделяемые задержкой, определяемой временем, затрачиваемым на движение от передней до задней оси и учесть, что расстояние между осями автомобиля ~ 3 м, то нетрудно получить расчетное значение скорости, которое оказывается равным ~ 72 км/час, достаточно близкое к фактическому значению. Из результатов эксперимента следует, что для получения данных о скорости движения наиболее пригодными являются отклики с выхода датчиков косы последних номеров, когда направление на удаляющий-

ся от траверза источник почти совпадает с осью косы (годографы 1, 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты демонстрируют возможность идентификации, пеленга и получения данных о параметрах движения движущегося легкового автомобиля на основе регистрации его акустических и сейсмических полей антенными решетками с применением стандартной обработки указанных сигналов.

- Заславский Ю. М., Заславский В. Ю., Соков А. М. Вестн. научно-технического развития 2016. № 10 С. 110.
 Заславский Ю. М., Заславский В. Ю. Вестн. научнотехнического развития 2017. № 1. С. 113.
- [3] *Ермолаев Т.В., Флаксман М.А.* Курс антенные решетки. Н.Новгород: ННГУ, 2007.

Acoustic and seismic field of movable sources of the noise and vibration

Yu. M. Zaslavsky^a, V. Yu. Zaslavsky, A. M. Sokov

Federal Research Center The Institute of Applied Physics RAS. Nizhny Novgorod, 603950, Russia E-mail: ^azaslav@ hydro.appl.sci-nnov.ru

Experimental investigations of natural noise and seismic oscillations induced by motor car quick moving along highway are carried out. The outer acoustic noise and antropogenic seismic signals are recorded by lengthwise microphone array and geophone cable. Fan patterns shown current direction of the movable object are plotted on the basis of electronic scanning of acoustic antenna directivity pattern central lobe. Thin spectral analysis and Doppler frequency shift measurement of discrete component of outer noise spectrum are used for the velocity control. Field pattern is plotted by results of recording on the geophone cable. Prognosis of the object motion direction and velocity is provided due to the wave hodograph lines formed on this field. Wave hodographs are used for checking the data of acoustic record and receiving of informative signs essential for classification also.

PACS: 43.50.+y *Keywords*: outer acoustic noise, seismic oscillations, movable motor car. *Received 10 July 2017*.

Сведения об авторах

- 1. Заславский Юрий Михайлович доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-47-64, e-mail: zaslav@appl.sci-nnov.ru.
- 2. Заславский Владислав Юрьевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-69, e-mail: zasvladislav@appl.sci-nnov.ru.
- 3. Соков Алексей Михайлович науч. сотрудник; тел.: (831) 416-46-08, e-mail: a.sokov@hydro.appl.sci-nnov.ru.