

УДК 550.341+550.834
OECD 01.03.AA

К анализу шума городского рельсового транспорта

Заславский Ю.М.¹, Заславский В.Ю.^{1,2}

¹В.н.с., ИПФ РАН, Н.Новгород, ул. Ульянова, 46

^{1,2}с.н.с., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород, пр. Гагарина, 23

Аннотация

Выполнены натурные эксперименты по регистрации воздушно-акустического шума движущегося городского рельсового транспорта линейной решеткой микрофонов со сканируемой характеристикой направленности. При анализе характеристик шума использованы специально разработанные алгоритмы и программы многоканальной обработки сигнала. По данным эксперимента установлено наличие угловой направленности акустического шума рельсового транспорта, характерной для определенной полосы в его частотном спектре. Построенные для этих частот полярные диаграммы воздушно-акустического шума демонстрируют резко обозначенные азимутальные направления с наибольшей интенсивностью излучения, по которым определяется текущее направление на источник. Присутствующие в диаграмме побочные лепестки обусловлены влиянием реверберации шума от близлежащих строений.

Ключевые слова: воздушно-акустический шум, рельсовый транспорт, диаграмма направленности антенны.

On the analysis of urban rail transport noise

Zaslavsky Yu.M.¹, Zaslavsky V.Yu.^{1,2}

¹Leader scientific researcher, Institute of applied physics, Russian academy of science, Nizhny Novgorod, Russia

^{1,2}Senior scientific researcher, Institute of applied physics, Russian academy of science, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

Full-scale experiments on the registration of air-acoustic noise of moving urban rail transport by a linear array of microphones with a scanned directional characteristic were performed. Specially developed algorithms and programs of multichannel signal processing are used in the analysis. According to the experiment it was found that in a wide spectrum of acoustic noise of rail transport it is possible to allocate a frequency band in which its radiation has a directivity. The polar diagrams of air-acoustic noise constructed for these frequencies demonstrate sharply marked azimuthal directions with the highest radiation intensity, by which the current direction to the source is determined. The side lobes present in the diagram are due to the effect of noise reverberation from nearby buildings.

Key words: air-acoustic noise, rail urban transport, radiation pattern.

Введение

В общей проблеме мониторинга шума, создаваемого при движении городского транспорта, можно выделить как составную часть шум рельсового транспорта [1–3]. При анализе шумовой обстановки, обусловленной транспортными источниками,

предполагается комплекс измерений акустического шума, в том числе, определение направлений, с которых шум средств городского транспорта проникает в зоны с высокой плотностью населения. В этой связи, в настоящей работе обсуждаются особенности в пространственно-угловых характеристиках, наблюдаемых при регистрации шума указанного вида транспорта. Направленность шумоизлучения определяется совместным влиянием конструктивных особенностей источника и спецификой распространения, т.е. характером городской застройки и атмосферными условиями в мегаполисе.

Для получения достоверных и надежных экспериментальных данных о транспортном шуме, создаваемом вагоном, движущимся внутри плотной городской застройки, используется специальный измерительный комплекс – антенная решетка микрофонов со сканируемой характеристикой направленности. Эксперименты дублируются несколькими измерительными сеансами с сохранением вида источника шума, представляющего собой типовой образец подвижного состава, участвующего в регистрации. Как часто принято при проведении натурных экспериментов, их реализация выполняется в апостериорном режиме на основе многоканальной регистрации сигналов микрофонами антенны с занесением в блоки памяти и с последующей обработкой.

Отличительной особенностью является использование специально выбранной частотной полосы анализа, о чем сказано далее. Поскольку целью исследования являются особенности угловых характеристик шума движущегося вагона, основное внимание представляют такие параметры как относительные вариации уровня шума, связанные с направленностью излучения. Кроме того, вопросы методики измерения направленности и их реализация при наличии реверберации (отражений) в условиях плотной городской застройки предполагают постоянное к себе внимание, ввиду сложности в обеспечении корректности их проведения.

1. Условия эксперимента

В натурных экспериментах используется линейная решетка всенаправленных микрофонов, установленная в воздухе вблизи поверхности грунта и ориентированная параллельно трассе движения. Приемная антенная решетка состоит из 32 идентичных всенаправленных микрофонов, расположенных эквидистантно в линию с шагом 0,1 м. Регистрация воздушно-акустического шума проводится в соответствии со схемой на рисунке 1, когда движущийся вагон является единственным источником акустического шума, присутствующим на трассе. Расстояние от трассы, по которой происходит

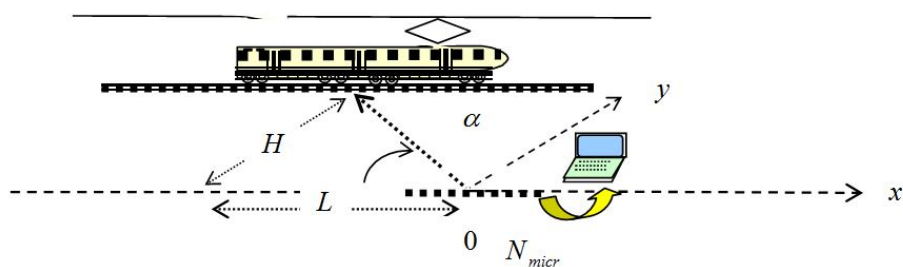


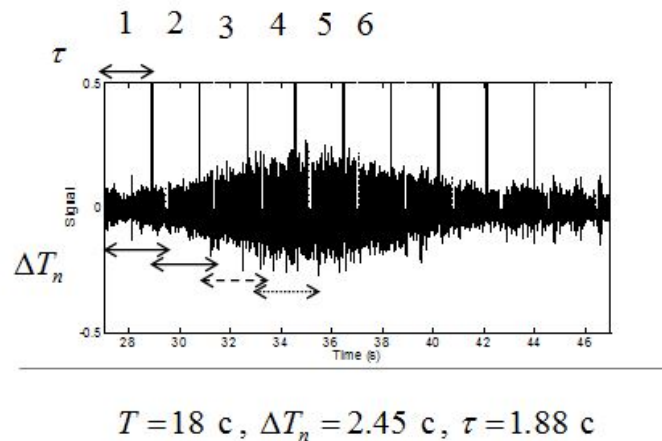
Рис. 1. Источник-приемная антенна-регистратор

движение, до базовой линии (ось x) с приемной антенной, расположенной вдоль нее, остается постоянным $H = 30 - 40$ м. После старта с некоторой точки, расположенной слева от траверза ($L \approx 90 - 100$ м), и набора постоянной средней скорости ($V \approx 7 - 10$ м/с) за промежуток времени 3 – 4 с, вагон движется по прямолинейной трассе, вначале

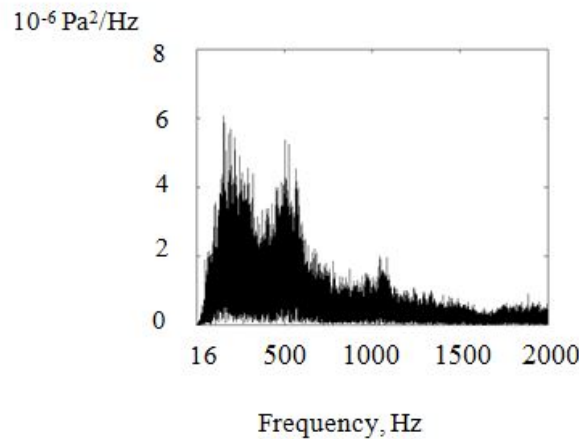
приближаясь к антенне, расположенной на траверзе, а затем удаляясь от нее. На рисунке 1 не представлены ограничивающие с двух сторон трассу движения здания, обуславливающие обратное отражение шума к источнику.

2. Результаты регистрации и первичной обработки

На рисунке 2 а представлена реализация шума, вызванного движением вагона, зарегистрированная в эксперименте одним из микрофонов в течение ($T \approx 18$ с). На рисунке 2 б представлен спектр шума, полученный после обработки всей реализации с указанной выше длительностью. На траверзе достигается максимум интегрального



а



б

Рис. 2. (а) уровень сигнала на выходе микрофона как функция времени (в безразмерных единицах), (б) спектральная плотность, соответствующая максимальному уровню шума в точке траверза

уровня шума ~ 69 дБ, акустический фон составляет $\sim 55 - 60$ дБ (0 дБ соответствует $2 \cdot 10^{-5}$ Па). Создаваемый исследуемым источником воздушно-акустический шум характеризуется частотной полосой умеренной ширины, в связи с чем, в качестве приемников в антенне используются электретные микрофоны (Panasonic VM-61), рабочая полоса частот которых перекрывает диапазон звуковых частот 16...16000 Гц,

коэффициент преобразования микрофонов с учетом действия предусилителей равен $K = 100$ мВ/Па. Эффективная полоса частот сигнала простирается до 2000 Гц (и несколько выше), причем, как видно из рисунка 2 б, спектральная плотность, достигая максимума на низкочастотном краю в районе 200 Гц, плавно спадает до уровня фона с ростом частоты. Кроме того, в спектре имеется локальный подъем в полосе 500 – 570 Гц. Присутствие в указанном (выделенном) частотном интервале такой особенности как направленность шумового излучения (что далее демонстрируется на иллюстрациях), позволяет предположить наличие частичной когерентности определенных компонент акустического шума, которые имеют в области локализации источника шума значительную амплитуду и сохраняют постоянным пространственное распределение фазы по фронту. Это обстоятельство вызывает интерес более подробного анализа угловых характеристик излучения шума, соответствующего локальному подъему в спектре.

На этапе первичной обработки выполнено разбиение всей реализации с полным временем наблюдения $T \approx 18$ с на $n = 10$ промежутков (временных окон ΔT_n). На каждом промежутке осуществляется обработка с целью построения характеристик направленности для шума в выше указанной частотной полосе, причем в алгоритме используются сигналы, регистрируемые всеми 32 микрофонами антенны. Далее представлены результаты, соответствующие четырем промежуткам – временным окнам с номерами $n = 3, 4, 5, 6$.

3. Результаты анализа характеристик направленности шума

Путем последовательного перебора временных промежутков (указанных номеров n) получен набор характеристик направленности шумового излучения, смена которых соответствует постепенной перестройке направления радиуса, соединяющего антенну микрофонов с источником шума, за счет его движения. Переход от одного окна к следующему $n \rightarrow n + 1$ осуществляется сдвигом на τ , обеспечивающим перекрытие с предыдущим окном, при этом окно анализа $\Delta T_n = 2,45$ с несколько превышает шаг смещения $\tau = 1,88$ с. Отметим, что в каждом временном промежутке проведена обработка реализаций принимаемых акустических сигналов в соответствии с разработанным алгоритмом, позволяющим сканировать диаграмму приемной антенны.

Указанный алгоритм основан на прибавке к фазе каждой спектральной компоненты Фурье-разложения сигнала, принятого любым элементом антенны, волнового набега, определяемого межэлементным расстоянием в решетке с учетом некоторого значения азимутального угла, равномерно перестраиваемого при сканировании максимума центрального лепестка характеристики направленности антенны [4,5]. В итоге выполнено построение угловых характеристик направленности транспортного шума – полярных (веерных) диаграмм, показывающих изменение уровня суммарного отклика $\langle (\sum_i p_i)^2 \rangle$ на выходе антенны, $i = 1...32$ (p_i - акустическое давление на i -м микрофоне), $\langle \rangle$ - усреднение по промежутку времени ΔT_n .

На рисунке 3 а, б, в, г представлены полярные диаграммы, описывающие направленность акустического шума, зарегистрированного в процессе прохождения вагоном 3, 4, 5, 6 временных отрезков (см. рисунок 2 а) и соответствующих им участков пути, наиболее близко расположенных к антенне, т.е. к точке пересечения линии траверза. Угловая характеристика образует диаграмму, которая состоит из совокупности остронаправленных пиков, распределенных по азимуту веером на углах $50^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$. Начальное угловое положение источника относительно линии, вдоль которой расположена апертура антенны, приходится на 3-й участок (первая реализация из представленных четырех реализаций полярной диаграммы на рисунке 3 а) и соответствует значению угла

азимута $\alpha \approx 50^\circ$, а конечное (рисунок 3 г) – $\alpha \approx 120^\circ$. Фактические направления на источник шума обозначены узким лепестком, представленным на рисунке 3 д, е, ж, з, соответствующих рисунку 3 а, б, в, г. Они получены по фиксации моментов прохода «вешек», расставленных вдоль пути следования транспорта с постоянным шагом по углу α .

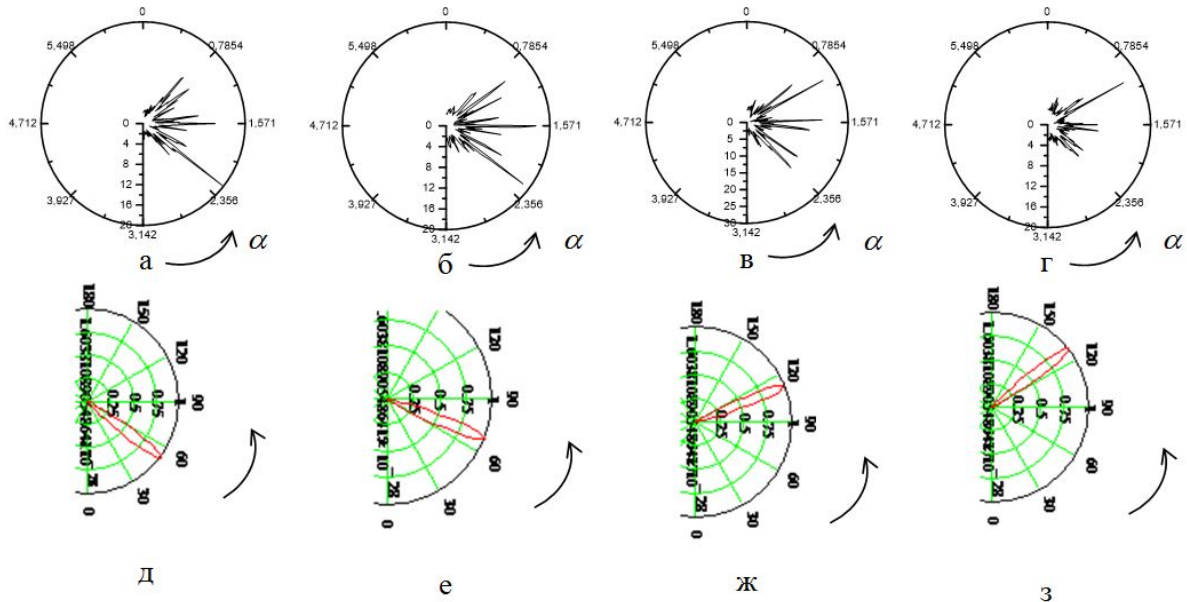


Рис. 3. а, б, в, г: Полярная (веерная) диаграмма шума как функция угла азимута на 3, 4, 5, 6 участках трассы. Полоса частот 500-570 Гц; д, е, ж, з: Узкий лепесток – фактическое направление на источник шума.

Характер перестроения азимутальной направленности стреловидных пиков, имеющих максимальную величину, при смене источником текущего положения позволяет сделать заключение о возможности угловой локализации источника на трассе, достигаемой при регистрации сигнала, принимаемого на 32-х элементную антенну. Вместе с тем, присутствие побочных пиков, имеющих несколько меньший уровень, чем максимальный, снижает возможность однозначного определения углового положения и количественной его оценки. Одной из причин возникновения побочных максимумов в полярной диаграмме является многократное волновое отражение (рассеяние) при распространении акустического транспортного шума в условиях городской застройки.

Для оценки величины угла, показывающего фактическое направление на источник на основе данных сканирования – с привязкой к характерным максимальным стреловидным пикам на веерных диаграммах, можно использовать формулу:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{m=1}^M A_m \alpha_m}{\sum_{m=1}^M A_m}, \quad (1)$$

где $1 \leq m \leq M$, $M \sim 5..7$ ориентировочное количество пиков значимой величины в полярной диаграмме, A_m - относительный вес каждого из учитываемых пиков, α_m - угол, соответствующий m -пику в диаграмме.

Относительный вес A_m в пределах $0..1$ берется непосредственно из отношения величины учитываемого пика в рассматриваемом ΔT_n -интервале к максимальному пиковому значению в веерной диаграмме.

Оценка углового положения, выполненная по формуле (1) для каждого из участков 3, 4, 5, 6 трассы с использованием данных (A_m и α_m), считываемых с диаграмм на рисунке 3 а, б, в, г, удовлетворительно соответствует угловому положению лепесткового репера (на рисунке 3 д, е, ж, з), указывающего на фактическое текущее положение источника шума в процессе движения.

Демонстрируемые выше диаграммы представляют пример возможности приближенной локализации источника шума по угловым координатам. В этой связи нетрудно оценить ее «угловую» точность (а также линейную при известной удаленности трассы от пункта приема на траверзе), на основе предположения, что квазигармоническое излучение регистрируется 32-х элементной линейной антенной на частоте ~ 535 Гц – средней в выбранной полосе (шаг дискретизации в антенне $d = 0,1$ м и $d/\lambda \cong 0,157353$). Угловое разрешение определяется шириной главного лепестка антенны, что позволяет записать:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{N_{micr}d} = \frac{340}{535 \cdot 32 \cdot 0,1} = 0,1986 \text{ рад } (11,38^\circ) \quad (2)$$

Данная оценка точности пространственной локализации источника по углу азимута учитывает только интерференционную волновую природу при формировании характеристики антенны. Эффекты волновой реверберации при распространении шума по внутригородской территории дадут аддитивный вклад – дополнительное уширение интервала «неопределенности».

В заключение отметим, что аналогичные исследования выполнены в отношении акустического шума движущегося автомобильного транспорта, при этом соответствующие результаты представлены в [6-8].

Заключение

По данным натурного эксперимента с использованием 32-х элементной приемной акустической антенны микрофонов построены полярные (веерные) диаграммы, показывающие характер углового распределения интенсивности акустического давления в шумовом поле, порождаемом городским рельсовым транспортом. Направленность шума, характеризуемая полярной диаграммой в виде совокупности остронаправленных пиков, распределенных по азимуту веером, свойственна излучению в некоторой частотной полосе спектра $\sim 500...570$ Гц. Для интерпретации полученных экспериментальных результатов, указывающих на присутствие нескольких острых максимумов в полярных диаграммах, авторами выдвинуто предположение о значительном влиянии рассеяния шума стенами зданий внутригородской застройки. Остронаправленность пиков, характерная для указанной частотной полосы, свидетельствует, по-видимому, о частичной когерентности, присутствующей в излучении, создаваемом рельсовым видом транспорта. В остальной широкой полосе частот спектральные компоненты шумового излучения, порождаемого транспортным источником, характеризуются слабо выраженной направленностью.

Список литературы

1. Proceedings of European Conference on Noise. (EuroNoise 2015) Netherland. Maasterichts. 2015.
2. Wersäll Carl, Bodare Anders and Massarsch K. Rainer Localization of Vibration Sources along Railway Tracks. Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, Solna Torg 13, SE-17145 Solna, Sweden 2012.

3. Pakhomov Alex and Goldburt Tim Field testing of new unattended small size seismic module for various target detection. Proc. of SPIE Vol. 6394, 63940D, (2006). 0277-786X/06/\$15. doi: 10.1117/12.714301.

4. Microphone phased arrays (Acoustic antennas) by V. Quaranta; presenter: A. Concilio The Italian Aerospace Research Centre, CIRA, 2010 (www.cav.psu.edu/.../cav2010_cira_concilio.pdf)

5. Ермолаев, Т.В., Флакман, М.А. Курс антенные решетки. ННГУ, Н.Новгород, 2007.

6. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю., Соков А.М. Пассивный способ обнаружения транспортного средства по его собственному акустическому шуму. ПАТЕНТ на изобретение № 2626284. Приоритет изобретения 20 июня 2016. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 25 июля 2017.

7. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю., Соков А.М. Акустическое и сейсмическое поле движущихся источников шума и вибрации (регистрация решеткой микрофонов и сейсмической косой) // Ученые записки физического факультета Московского университета. № 5, 1751405-1-4 (2017).

8. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю., Соков А.М. Акустический шум движущегося легкового автомобиля // Вестник научно-технического развития. 2017. № 1 (113). С. 29-37.