

## ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА АЗИМУТАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НА СЛУЧАЙ ИЗМЕРЕНИЙ ВБЛИЗИ ЖЕСТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2015 г. В. Ф. Копьев\* \*\* , Г. А. Фараносов\* \*\*

\*ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ  
105005 Москва, ул. Радио 17

\*\*Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990 Пермь, Комсомольский просп. 29

E-mail: vkopiev@mksagi.ru

Поступила в редакцию 25.08.2014 г.

Предложен способ разложения звукового поля компактного источника на азимутальные компоненты с использованием нерегулярно расположенных микрофонов.

*Ключевые слова:* метод азимутальной декомпозиции, шум струи, мультипольные источники.

DOI: 10.7868/S0320791915010062

Разложение звукового поля на азимутальные компоненты нашло широкое применение в аэроакустике [1–12], поскольку оно часто позволяет получать и анализировать нетривиальную дополнительную информацию (помимо стандартных диаграмм направленности, спектральной плотности сигналов и т.д.) не только о структуре звукового поля, но отчасти и о структуре самого источника звука. Например, тот факт, что излучение компактного источника в дальнем поле в покоящейся безграничной среде может быть представлено в виде суперпозиции излучения базисных мультиполей, диаграммы направленности которых описываются соответствующими сферическими функциями [4, 5, 13, 14], позволил в явном виде определить мультипольную структуру таких сложных источников, как турбулентное вихревое кольцо [2, 3], турбулентная дозвуковая струя [4], цилиндр, обтекаемый потоком [5, 12], где при необходимости вводилась поправка на конвекцию источника, а разложение проводилось для умеренных частот, при которых данные источники можно считать компактными. Полученные данные о физических особенностях источников шума могут быть использованы и для создания упрощенных теоретических моделей источника шума турбулентных течений [4, 8, 10], и для разработки новых способов снижения шума [12], и для прецизионной валидации численных методов моделирования шума [10, 11]. Обычно азимутальное разложение проводится с помощью регулярных решеток микрофонов, когда последние располагаются равномерно на окружности с центром на оси, относительно которой проводится разложение (ось  $x$  на рис. 1а) [2–12]. Ориентация этой

оси определяется либо направлением скорости основного потока (например, струя или поток, обтекающий какое-либо тело), либо скоростью движения самого источника (например, вихревое кольцо). Однако возможны ситуации, когда технически сложно размещать микрофоны равномерно по окружности вокруг азимутальной оси. Например, если имеется необходимость анализа азимутальных компонент дальнего звукового поля струи реактивного двигателя на открытом стенде, то в этом случае, с одной стороны, окружить струю кольцевой решеткой равномерно распределенных микрофонов в дальнем поле сложно вследствие значительных размеров самого двигателя и его положения над поверхностью стенда (на высоте до 5 м), а с другой стороны, даже если бы такая возможность была, то возникла бы непростая задача отделения прямого и отраженного сигналов на каждом микрофоне. В таком случае оптимальным вариантом могло бы стать легко реализуемое расположение микрофонов на поверхности. Из сигналов расположенных таким образом микрофонов легко получить сигнал, соответствующий свободному полю, если поверхность жесткая и выполнены условия зеркального отражения (удвоение сигнала).

Таким образом, возникает задача обобщения метода азимутальной декомпозиции (МАД) на случай нерегулярного по радиальной ( $r$ ) и азимутальной ( $\theta$ ) координатам размещения микрофонов в свободном поле. Положение микрофонов в одной плоскости будет соответствовать условию открытого стенда с микрофонами, установленными в непосредственной близости от жесткой

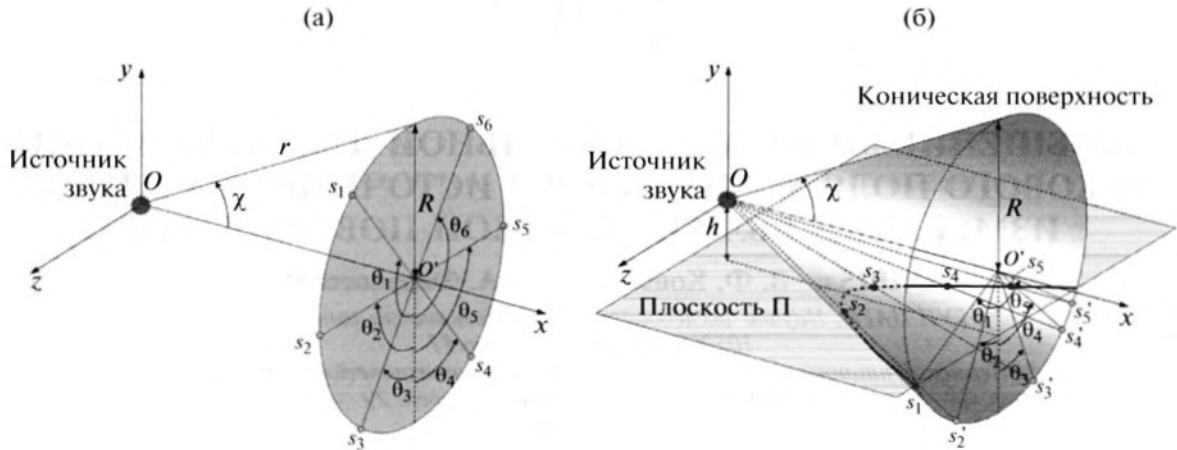


Рис. 1. Схема расположения микрофонов.

поверхности (с условием удвоения сигнала на микрофонах). Другой пример нерегулярного расположения микрофонов – выбор не всех микрофонов из стандартной шестимикрофонной решетки с микрофонами, расположенными в углах правильного шестиугольника.

Сформулируем задачу азимутального разложения следующим образом. Пусть сигнал  $p(r, \theta, \chi, t)$ , создаваемый в дальнем поле некоторым точечным источником, расположенным в начале координат (рис. 1а), является суперпозицией не более чем  $N$  первых азимутальных мод (от 0 до  $N - 1$ ):

$$p(r, \theta, \chi, t) = A_0(r, \chi, t) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_n(r, \chi, t) \cos n\theta + B_n(r, \chi, t) \sin n\theta). \quad (1)$$

На первом шаге рассмотрим нерегулярное расположение микрофонов только по азимутальному углу, т.е. зафиксируем координаты  $r$  и  $\chi$ , что будет означать нахождение наблюдателя на окружности радиуса  $R = r \sin \chi$  (рис. 1а). Тогда в каждый момент времени для нахождения  $2N - 1$  коэффициента разложения (1) нужно иметь результаты как минимум  $2N - 1$  измерений поля  $p(r, \theta, \chi, t)$  (обозначим их  $s_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, 2N - 1$ ) при различных азимутальных углах  $\theta$  (обозначим их  $\theta_i$ ,  $i = 1, \dots, 2N - 1$ ). Действительно, тогда коэффициенты разложения (1) можно однозначно определить из решения линейной системы уравнений  $Q \mathbf{f} = \mathbf{s}$ :

$$\mathbf{f} = Q^{-1} \mathbf{s}, \quad (2)$$

где

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & \cdots & \sin((N-1)\theta_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \theta_{2N-1} & \sin \theta_{2N-1} & \cdots & \sin((N-1)\theta_{2N-1}) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} A_0(r, \chi, t) \\ A_1(r, \chi, t) \\ B_1(r, \chi, t) \\ \vdots \\ A_{N-1}(r, \chi, t) \\ B_{N-1}(r, \chi, t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_{2N-1}(t) \end{pmatrix}.$$

Таким образом, выражение (2) дает формальное решение задачи об определении коэффициентов азимутального разложения звукового поля с использованием микрофонов, расположенных в некотором поперечном относительно азимутальной оси сечении, на фиксированном от нее расстоянии  $R$  (рис. 1а). Условие  $\det Q \neq 0$  обеспечивается выбором соответствующих азимутальных углов. Поскольку в реальных ситуациях не всегда можно априори гарантировать, что в азимутальной структуре поля будет наблюдаться именно  $N$  первых мод (допустим, что неизвестно, только ли дипольное излучение будет доминировать в дальнем поле или же будет значимой и квадрупольная часть), может оказаться полезным добавить еще один микрофон, чтобы иметь возможность проверить условие  $\|A_N\|, \|B_N\| \ll \|A_i\|, \|B_i\|$ ,  $i = \overline{0, N-1}$  в том случае, если известно, что  $\|A_N\| \sim \|B_N\|$  (в качестве нормы сигналов можно брать, например, их среднеквадратичные значения). Тогда соответствующим образом изменятся формулы (1), (2). Именно такой случай с равномерным распределением шести микрофонов по окружности (см. рис. 1а, где  $\theta_1 = -\theta_6 = 5\pi/6$ ,  $\theta_2 = -\theta_5 = \pi/2$ ,  $\theta_3 = -\theta_4 = \pi/6$ ) реализован в качестве стандартного инструмента исследования шума турбулентных течений в заглушенной камере АК-2 в НИО-9 ЦАГИ [2–7, 9–12]. Отметим, что минимально необходимое число микрофонов для распознавания источников вплоть до квадруполь-

ных ( $N = 3$ ) равно  $2N - 1 = 5$ , а шестой микрофон носит вспомогательный характер для проверки того, что  $\|A_3\|, \|B_3\| \ll \|A_i\|, \|B_i\|, i \leq 2$ . При этом выражение (2) в точности сводится к формулам декомпозиции, приведенным, например, в [3].

Проверка того, что формула (2) работоспособна и при неравномерном расположении микрофонов, была выполнена в эксперименте, проведенном в АК-2, со струей, истекающей со скоростью 135 м/с из круглого сопла диаметром 0.04 м. В измерениях использовалась стандартная шестимикрофонная решетка ( $R = 0.85$  м). Сигналы микрофонов подавались на анализатор Briel & Kjaer PULSE 3560D, решетка перемещалась вдоль оси струи с помощью traversной системы FESTO. В результате измерений в выбранных полосах частот получались диаграммы направленности разрешаемых азимутальных мод на цилиндрической поверхности, заматаемой решеткой микрофонов при ее смещении вдоль оси струи, как при использовании всех шести микрофонов (регулярное расположение), так и при использовании только пяти из них (нерегулярное расположение) с соответствующим изменением матрицы  $Q$  в формуле (2). Для обработки данных использовалась собственная программа, реализованная на языке Fortran. Результаты измерений пятью и шестью микрофонами для полосы частот 600–800 Гц представлены на рис. 2 в виде зависимости квадрата звукового давления каждой азимутальной компоненты в указанной полосе частот на цилиндрической поверхности  $R = 0.85$  м, нормированного на ширину полосы (200 Гц), от расстояния, отсчитываемого вдоль оси струи (срез сопла соответствует координате 0.6 м). Эти направленности азимутальных компонент шума струи подробно описаны, например, в [4] и получены здесь по стандартным формулам декомпозиции [3] или с помощью разрешения системы (2). Как видно, оба способа дают близкие результаты (отметим, что шкала по оси ординат линейная). Наблюдаемое незначительное расхождение может быть связано с тем, что матрица  $Q$  для случая пяти микрофонов имеет большее число обусловленности, чем для равномерно распределенных шести микрофонов, а значит, МАД, реализованный с помощью расположенных таким образом пяти микрофонов, более чувствителен к возможным ошибкам в их позиционировании и точности измерения звукового давления.

Легко теперь обобщить полученный способ на случай расположения микрофонов на различных расстояниях от источника. Отдельные азимутальные компоненты после их усреднения по азимутальному углу зависят только от угла  $\chi$  [4], поэтому для их измерения угол  $\chi$  должен оставаться фиксированным, т.е. микрофоны для измерения каждой моды должны располагаться на кониче-

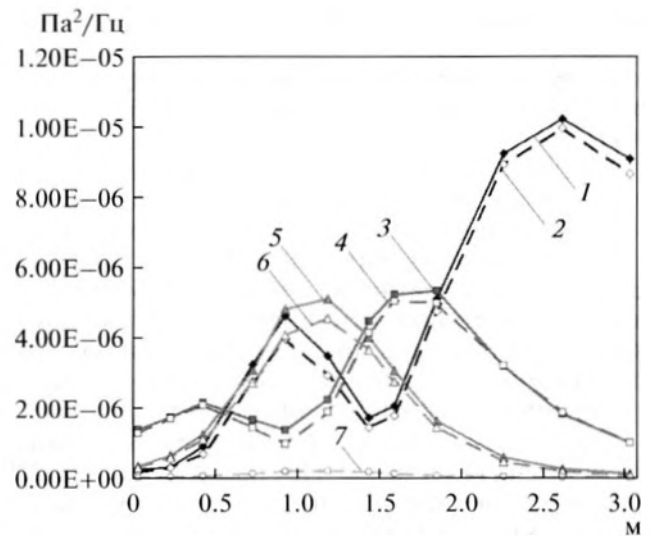


Рис. 2. Диаграммы направленности азимутальных мод в полосе частот 600–800 Гц: 1, 2 – направленности осесимметричной моды; 3, 4 – первой моды; 5, 6 – второй моды; 7 – третьей моды. Сплошные линии получены с использованием пяти микрофонов, пунктирные – шести микрофонов.

ской поверхности (рис. 1б). В качестве исходных сигналов мы будем иметь тогда

$$s_i(r_i, t) = A_0(r_i, \chi, t) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_n(r_i, \chi, t) \cos n\theta + B_n(r_i, \chi, t) \sin n\theta),$$

$$i = 1, \dots, 2N - 1.$$

Очевидно, что для получения азимутального разложения нужно привести все сигналы к одному расстоянию от источника (например, к расстоянию  $r_1$  до первого микрофона) и к одному моменту времени испускания сигнала, введя поправки на амплитуды согласно закону  $1/r$  и соответствующие времена задержки  $(r_1 - r_i)/c$ , где  $c$  – скорость звука, а затем воспользоваться формулой (2) с новым вектором сигналов  $s'$  с компонентами  $s'_i = s_i(r_i, t - (r_1 - r_i)/c) r_i/r_1$ . Для случая измерений на идеально отражающей плоскости в  $s'_i$  нужно еще ввести коэффициент 0.5. Также отметим, что для данного полярного угла  $\chi$  при расположении микрофонов в одной плоскости П, параллельной азимутальной оси и проходящей на некотором расстоянии  $h$  от нее, они должны находиться на гиперболической линии, получающейся пересечением данной плоскости с конической поверхностью, имеющей угол полураствора  $\chi$  (рис. 1б). Кроме того, при измерениях необходимо располагать микрофоны таким образом, чтобы они заматали как можно больший диапазон азимутальных углов, в противном случае матрица  $Q$  может оказаться настолько плохо обусловлен-

ной, что неизбежные ошибки позиционирования микрофонов и ограниченная точность измерения ими звукового давления не позволят получить корректные коэффициенты азимутального разложения.

Таким образом, в данной работе метод азимутальной декомпозиции звукового поля компактного источника обобщен на случай нерегулярного расположения микрофонов. В такой формулировке МАД, в принципе, может быть реализован в условиях открытого стенда при наличии зеркально отражающей поверхности и при наличии ограничений на расположение микрофонов в пространстве вокруг источника шума.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ по Постановлению № 220 “О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования” по договору № 14.Z50.31.0032.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Juve D., Sunyach M., Comte-Bellot G.* Filtered azimuthal correlations in the acoustic far field of a subsonic jet // *AIAA J.* 1979. V. 17. № 1. P. 112–114.
2. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A.* Sound radiation from a free vortex ring and a ring crossing an obstacle // *AIAA Paper.* 1998. AIAA-1998-2371.
3. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Котова А.Н.* Представление звукового поля турбулентного вихревого кольца суперпозицией квадрупольей // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 6. С. 793–801.
4. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A., Ostrikov N.N.* Vortex ring input in subsonic jet noise // *Int. J. Aeroacoust.* 2007. V. 6. № 4. P. 375–405.
5. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф.* Механизм генерации звука турбулентностью вблизи твердого тела // *Изв. РАН МЖГ.* 2008. V. 43. № 1. P. 98–109.
6. *Cavaliere A.V.G., Jordan P., Colonius T., Gervais Y.* Axisymmetric superdirectivity in subsonic jets // *J. Fluid Mech.* 2012. V. 704. P. 388–420.
7. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источника шума в струях // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 4. С. 482–497.
8. *Suzuki T.* Coherent noise sources of a subsonic round jet investigated using hydrodynamic and acoustic phased-microphone arrays // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 730. P. 659–698.
9. *Kopiev V.F., Chernyshev S.A.* Simulation of azimuthal characteristics of turbulent jet noise by correlation model of quadrupole noise sources // *Int. J. Aeroacoust.* 2014. V. 13. № 1. P. 39–60.
10. *Копьев В.Ф., Шур М.Л.* Азимутальные компоненты звукового поля турбулентной струи: результаты измерений и их использование для валидации современных методов расчета шума // *Ученые записки ЦАГИ.* 2010. Т. 41. № 1. С. 5–12.
11. *Faranosov G.A., Goloviznin V.M., Karabasov S.A., Kondakov V.G., Kopiev V.F., Zaitsev M.A.* CABARET method on unstructured hexahedral grids for jet noise computation // *Computers & Fluids.* 2013. V. 88. P. 165–179.
12. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Ostrikov N.N.* New noise source mechanism of flow/surface interaction as applied to airframe noise reduction // *AIAA Paper.* 2006. AIAA-2006-2717.
13. *Бобровницкий Ю.И.* Физическая модель и характеристики ближнего поля мультиполя // *Акуст. журн.* 1998. Т. 44. № 1. С. 11–20.
14. *Скучик Е.* Основы акустики. Т. 2. М.: Мир, 1976. 544 с.