

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДИПОЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ПЛОСКИМИ МИКРОФОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

© 2019 г. О. П. Бычков^{а, *}, М. А. Демьянов^{а, с}, Г. А. Фараносов^{а, б}

^аФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ,
ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

^бПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр. 29, Пермь, 614990 Россия

^сМосковский физико-технический институт, пер. Институтский 9, г. Долгопрудный, 141700 Россия

*e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

После доработки 04.03.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

Проведено обобщение классического алгоритма локализации источников шума плоской микрофонной решеткой на случай его применения к источникам дипольного типа. Проведена верификация разработанного алгоритма и его валидация на основе обработки данных экспериментальных исследований шума обтекания цилиндра и шума взаимодействия струи с пластиной. Проведено сравнение результатов локализации дипольных источников шума с помощью плоской микрофонной решетки на основе разработанного алгоритма и азимутальной решетки на основе метода азимутальной декомпозиции.

Ключевые слова: диполь, микрофонная решетка, азимутальные моды

DOI: 10.1134/S032079191905006X

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы неуклонно растет популярность использования многоканальных массивов микрофонов для локализации источников шума применительно к задачам аэроакустики [1–3]. Современные системы сбора данных позволяют проводить синхронные измерения антеннами из сотен микрофонов и применяются они как в лабораторных исследованиях [4–10], так и при испытаниях натуральных объектов на стендах [11–14] и даже в условиях реальной эксплуатации [15–18]. Актуальность развития методов локализации источников для задач авиационной акустики объясняется тем, что современный самолет представляет собой исключительно сложный с точки зрения акустического излучения объект. При этом авиационный шум на местности регулируется жесткими требованиями ИКАО [19], что заставляет авиапроизводителей непрерывно совершенствовать методы его диагностики и искать способы снижения шума. В шум, создаваемый самолетом на режиме взлета и посадки, могут вносить сравнимый вклад множество источников, отличающихся природой возникновения, пространственным расположением источников и мультипольной структурой излучаемого звукового поля. Стандартные измерения суммарного шума по-

добного объекта обычно не позволяют оценить степень значимости каждого источника и сформировать стратегию снижения шума в целом, которая должна быть направлена на одновременное снижение всех наиболее существенных источников, излучающих звук сравнимой амплитуды. Именно для идентификации и ранжирования отдельных источников шума самолета [15, 16] или его элементов (например, крыла [8, 9, 17] или шасси [5]), главным образом, применяются методы локализации, основанные на использовании многомикрофонных решеток.

Наиболее часто для указанной задачи используются плоские микрофонные решетки. Развитие методов локализации источников шума в акустике началось достаточно давно [20], и с тех пор на данном направлении достигнут значительный прогресс, а само направление получило собственное название – “beamforming”, общепринятое в англоязычной литературе [1–3]. Изначально, в силу отсутствия достаточных вычислительных мощностей, использовались простые алгоритмы [3], которые позволяли оценить направление на источник звука, и не давали информации об интенсивности источника. В дальнейшем, совершенствование систем сбора и обработки данных позволило разрабатывать и применять более со-

вершенные методы, позволяющие оценивать и интенсивность, и положение источников шума [3].

В настоящее время плоские микрофонные решетки для локализации источников шума являются стандартным инструментом исследования и выпускаются различными производителями [21, 22]. В таких стандартных системах локализации, поставляемых с соответствующим программным обеспечением, алгоритмы обработки обычно основаны на представлении звукового поля как результата излучения некоррелированных монополей в неподвижной среде [1–3]. Между тем, в аэроакустике часто приходится встречаться с источниками другой мультипольности. Так, шум обтекания твердых тел носит дипольный характер [23], а шум свободного турбулентного течения – квадрупольный [24]. Следовательно, в некоторых случаях может потребоваться модификация стандартных алгоритмов под конкретные условия эксперимента (например, наличие спутного потока, рефракция на слое смещения [25]) и/или особенности источника шума (мультипольность источников [4, 8], движение источников [26, 27]), в противном случае локализация источников и определение их интенсивности могут быть некорректными.

Целью настоящей работы является разработка и реализация алгоритма для определения характеристик источников дипольного типа с помощью стандартной плоской микрофонной решетки. В ЦАГИ для лабораторных исследований используется 42-канальная плоская антенна Briel&Kjaer со штатными алгоритмами обработки на основе некоррелированных монополей источников [22]. Отметим, что в работах [4, 8] были представлены реализации алгоритмов для распознавания дипольных источников шума, соответственно двухмерной и трехмерной решетками. Однако экспериментально данные алгоритмы проверялись лишь для случая доминирования дипольного источника одной ориентации. В настоящей работе на примере шума обтекания цилиндра впервые продемонстрирована возможность одновременного распознавания решеткой двух ортогональных некоррелированных диполей сравнимых амплитуд.

Полученные в работе результаты диагностики дипольных источников с помощью плоской антенны для случая обтекания цилиндра и шума взаимодействия струи и пластины сравниваются с известными результатами по определению мультипольной структуры источников с помощью кольцевой решетки микрофонов, используемой в методе азимутальной декомпозиции (МАД) [33, 35]. Отметим, что использование азимутальных решеток нашло широкое применение в аэроакустике [28–36], поскольку с их помощью можно получать разложение звукового поля на азимутальные моды, что в некоторых случаях

позволяет делать выводы о мультипольной структуре источника звука и его местоположении с использованием значительно меньшего количества микрофонов, чем в плоских решетках. В работах [29, 30, 33–36] МАД был реализован с помощью 6-микрофонной решетки в виде штатного инструмента исследования шума турбулентных течений. Так, с помощью анализа направленностей азимутальных компонент удалось определить мультипольную структуру таких источников шума, как турбулентное вихревое кольцо [29], турбулентная дозвуковая струя в свободном пространстве [30, 31, 34] и вблизи пластины [35], цилиндр, обтекаемый потоком [33], течение в коронном разряде, стекающем с острия иглы [36]. В настоящей работе результаты распознавания дипольных источников с помощью МАД будут использованы для валидации разработанного алгоритма обработки данных измерений плоской решеткой.

МОНОПОЛЬНЫЙ И ДИПОЛЬНЫЙ АЛГОРИТМЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ПЛОСКОЙ РЕШЕТКИ

На первом шаге исследований был реализован стандартный алгоритм метода локализации (Conventional Beamforming – СВ) на основе некогерентных монополейных источников [2]. Предполагается, что источники находятся в плоскости XU , а микрофонная решетка параллельна этой плоскости. Задача решается в частотной области. Предполагаемая зона расположения источников в плоскости XU покрывается дискретной сеткой, содержащей N_s узлов. В узлах сетки располагаются точечные монопольные гармонические источники с неизвестными (комплексными) амплитудами $a_j, j = 1, \dots, N_s$. Источники предполагаются взаимно-некогерентными, т.е. $\overline{a_i a_j^*} = 0$ при $i \neq j$ (черта сверху здесь и далее означает осреднение по ансамблю реализаций). Задачей является найти для каждой частотной компоненты сигнала такой набор величин a_j , который бы наилучшим образом (в некоторой норме) соответствовал данным измерений микрофонной решеткой, состоящей из N_m микрофонов.

В соответствии с алгоритмом СВ, давление, индуцированное на микрофонах, разбивается на совокупность временных отрезков (возможно, с перекрытием). Временные сигналы затем переводятся в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье

$$\hat{p}_i(t_n) \xrightarrow{FFT} p_i(f_n),$$

где i – номер микрофона в решетке, $i = 1, \dots, N_m$. Далее формируется матрица взаимных спектров S размером $N_m \times N_m$, элементами которой для

данной компоненты f_n являются $C_{ij} = p_i(f_n)p_j^*(f_n)$.

Отметим, что $C_{ij}^* = C_{ji}$, т.е. матрица \mathbf{C} является эрмитовой. В дальнейшем для краткости будем опускать аргумент f_n , считая, что анализ проводится для выбранной частоты f_n .

С помощью распределенных в узлах сетки в плоскости XU монополюсных источников строится приближение матрицы \mathbf{C} . На микрофоне с номером i заданное распределение источников индуцировало бы сигнал

$$s_i = \sum_{j=1}^{N_s} a_j q_{ij},$$

где $q_{ij} = \frac{e^{ik|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j|}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j|}$ – сигнал, создаваемый j -м источником

единичной амплитуды, расположенным в точке с радиус-вектором \mathbf{r}'_j , на i -м микрофоне, характеризующимся вектором \mathbf{r}_i , при этом $k = 2\pi f_n/c$. Векторы \mathbf{q}_j размерности $N_m \times 1$ называют “направляющими” векторами [1–3]. Тогда матрица взаимных спектров \mathbf{C}' для точек, соответствующих положению микрофонов в решетке, состояла бы из элементов

$$C'_{ij} = \overline{s_i s_j^*} = \sum_{n=1}^{N_s} \alpha_n q_{in} q_{jn}^* \quad (1)$$

где $\alpha_n = \overline{a_n^2}$ – среднеквадратичное значение амплитуды n -го источника. При выводе (1) использовалось свойство некоррелированности различных источников.

Задача локализации источников шума сводится, таким образом, к минимизации величины $\|\mathbf{C} - \mathbf{C}'\|$ за счет выбора α_n . Для евклидовой нормы

[37] $\|\mathbf{C} - \mathbf{C}'\|_E = \left(\sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} (C_{ij} - C'_{ij})^2 \right)^{1/2}$ с учетом эрмитовости матрицы \mathbf{C} задача имеет аналитическое решение [2]

$$\alpha_n = \frac{\mathbf{q}_n^H \mathbf{C} \mathbf{q}_n}{\|\mathbf{q}_n\|^4}, \quad (2)$$

где индекс H обозначает операцию сопряжения и транспонирования.

В настоящее время существует множество вариантов формулировки и решения задачи минимизации различия между экспериментально измеренными данными и результатами их моделирования совокупностью некогерентных монополюсных источников, а также различные методы оптимизации числа и положения микрофонов в решетке

[38]. Выше описан один из простейших алгоритмов, который, тем не менее, часто используется и реализован во всех стандартных приложениях. Анализ других алгоритмов выходит за рамки настоящей работы.

Описанный выше алгоритм был реализован и верифицирован для используемой 42-микрофонной решетки Briel&Kjaer диаметром 1 м с диапазоном рабочих частот ~ 0.3 – 6.4 кГц (рис. 1). Были смоделированы сигналы трех гармонических монополюсных источников одинаковых амплитуд на частоте 2.5 кГц, расположенных в плоскости, параллельной решетке, в точках с координатами (0, 0), (0.2, 0), (–0.05, –0.2), как показано на рис. 2. Результаты локализации показаны на рис. 2б для сетки источников размером 60×60 . Как видно, алгоритм позволяет восстановить положения источников и оценить их интенсивности (по максимальным уровням α_n). Здесь и далее в качестве величины, характеризующей интенсивность источника, мы будем понимать максимальную величину среднеквадратического значения акустического давления, создаваемого источником на удалении 1 м. На картах локализации данную величину будем выражать в дБ.

Алгоритм для локализации источников дипольного типа был построен аналогичным образом. При его реализации предполагалось, что дипольные моменты исследуемых источников лежат в плоскости XU , а также, что x - и y -компоненты дипольных моментов некоррелированы (как имеет место, например, при исследовании шума обтекания цилиндра). Тогда модельное распределение источников можно составить из x - и y -диполей с неизвестными амплитудами $a_j^{(x)}$ и $a_j^{(y)}$, $j = 1, \dots, N_s$. Источники предполагаются взаимно-некогерентными, т.е.

$a_i^{(x)} a_j^{(x)*} = 0$ при $i \neq j$. Направляющие векторы тогда

будут двух видов: векторы $\mathbf{q}_j^{(x)}$ с компонентами $q_{ij}^{(x)} = \frac{e^{ik|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j|}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j|^3} (ik|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j| - 1)(x_i - x'_j)$ и векторы $\mathbf{q}_j^{(y)}$ с

компонентами $q_{ij}^{(y)} = \frac{e^{ik|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j|}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j|^3} (ik|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j| - 1)(y_i - y'_j)$.

В таком случае матрица взаимных спектров \mathbf{C}' для точек, соответствующих положению микрофонов в решетке, будет моделироваться следующим образом

$$C'_{ij} = \sum_{n=1}^{N_s} (\alpha_n^{(x)} q_{in}^{(x)} q_{jn}^{(x)*} + \alpha_n^{(y)} q_{in}^{(y)} q_{jn}^{(y)*}). \quad (3)$$

Задача минимизации $I = \|\mathbf{C} - \mathbf{C}'\|_E$ также может быть ре-

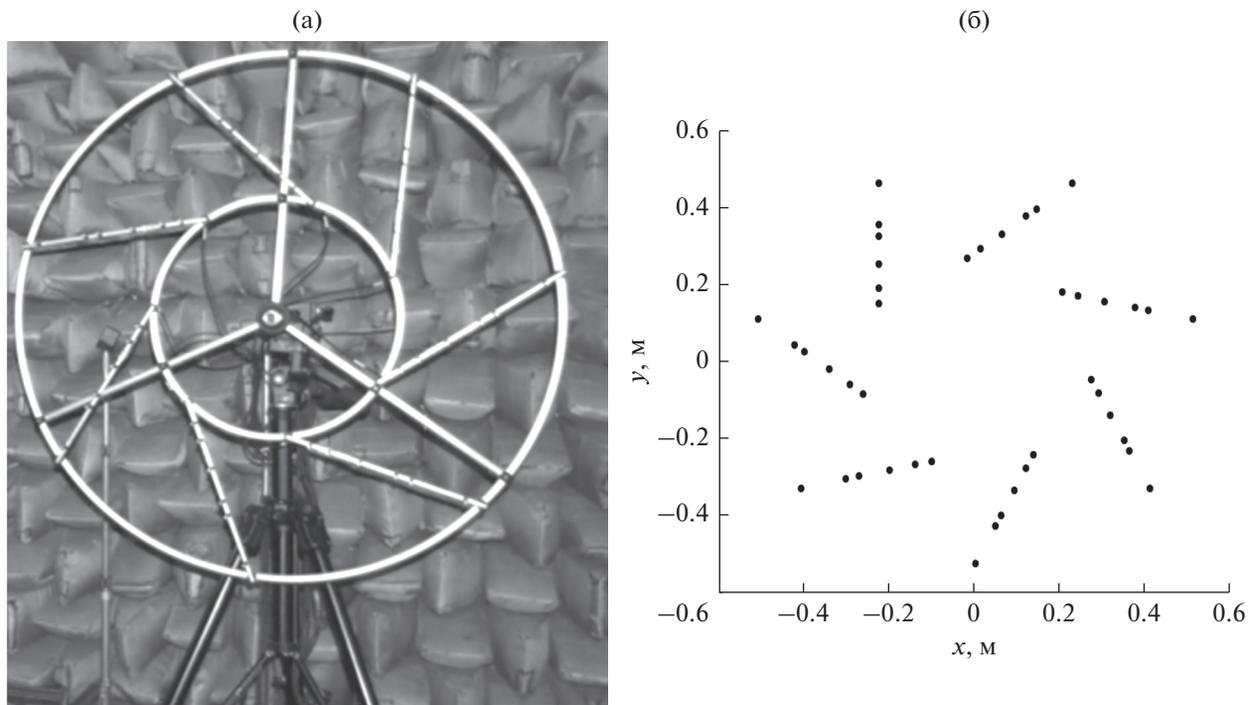


Рис. 1. 42-канальная микрофонная решетка Briel&Kjaer: (а) – фото, (б) – схема расположения микрофонов в решетке.

шена аналитически путем определения экстремума целевой функции I :

$$\alpha_n^{(x)} = \frac{\|\mathbf{q}_n^{(y)}\|^4 \mathbf{q}_n^{(x)H} \mathbf{C} \mathbf{q}_n^{(x)} - |\mathbf{q}_n^{(x)H} \mathbf{q}_n^{(y)}|^2 \mathbf{q}_n^{(y)H} \mathbf{C} \mathbf{q}_n^{(y)}}{\|\mathbf{q}_n^{(x)}\|^4 \|\mathbf{q}_n^{(y)}\|^4 - |\mathbf{q}_n^{(x)H} \mathbf{q}_n^{(y)}|^4},$$

$$\alpha_n^{(y)} = \frac{\|\mathbf{q}_n^{(x)}\|^4 \mathbf{q}_n^{(y)H} \mathbf{C} \mathbf{q}_n^{(y)} - |\mathbf{q}_n^{(x)H} \mathbf{q}_n^{(y)}|^2 \mathbf{q}_n^{(x)H} \mathbf{C} \mathbf{q}_n^{(x)}}{\|\mathbf{q}_n^{(x)}\|^4 \|\mathbf{q}_n^{(y)}\|^4 - |\mathbf{q}_n^{(x)H} \mathbf{q}_n^{(y)}|^4}. \tag{4}$$

Таким образом, описанный алгоритм, который для краткости будем далее обозначать СВ-D, позволяет локализовать некоррелированные дипольные источники с дипольными моментами, лежащими в плоскости, параллельной решетке.

Верификация алгоритма проводилась для виртуальных гармонических по времени дипольных источников. Результаты для y -диполя, расположенного в плоскости XU в точке с координатами $(0, -0.2)$ (рис. 3), приведены на рис. 4. Результаты применения стандартного монопольного алгоритма СВ представлены на рис. 4а. Хорошо видны два пика, центральная точка между которыми примерно соответствует заданному положению диполя (схожие результаты были получены в [4]). Однако амплитуды пиков при этом не позволяют оценить интенсивность излучения диполя в максимуме направленности, т. к. поле диполя преимущественно ориентировано вдоль его оси.

Карта локализации, показанная на рис. 4а, может быть ошибочно интерпретирована как совокупность двух достаточно слабых монопольных источников, что абсолютно не соответствует исходному источнику. Напротив, применение дипольного алгоритма позволяет корректно определить положение и интенсивность источника (рис. 4б), при этом исключается неоднозначная интерпретация карты локализации.

Таким образом, при использовании для локализации дипольного источника стандартного алгоритма, акустическая карта может ошибочно быть интерпретирована как комбинация двух некогерентных монополей. Действительно, при такой ориентации диполя относительно решетки последняя оказывается в области скачка фазы сигнала, который не может быть корректно смоделирован с помощью совокупности некоррелированных монополей. Таким образом, монопольный алгоритм не может обеспечить надежную локализацию и оценку амплитуды для дипольного источника с дипольным моментом, параллельным плоскости решетки. Отметим, что для диполя, ориентированного перпендикулярно к сканирующей плоскости, когда на решетку попадает один лепесток диаграммы направленности, стандартный алгоритм позволяет корректно локализовать положение источника, а также оценить его интенсивность в том случае, когда вся решетка оказывается в области максимума излучения диполя.

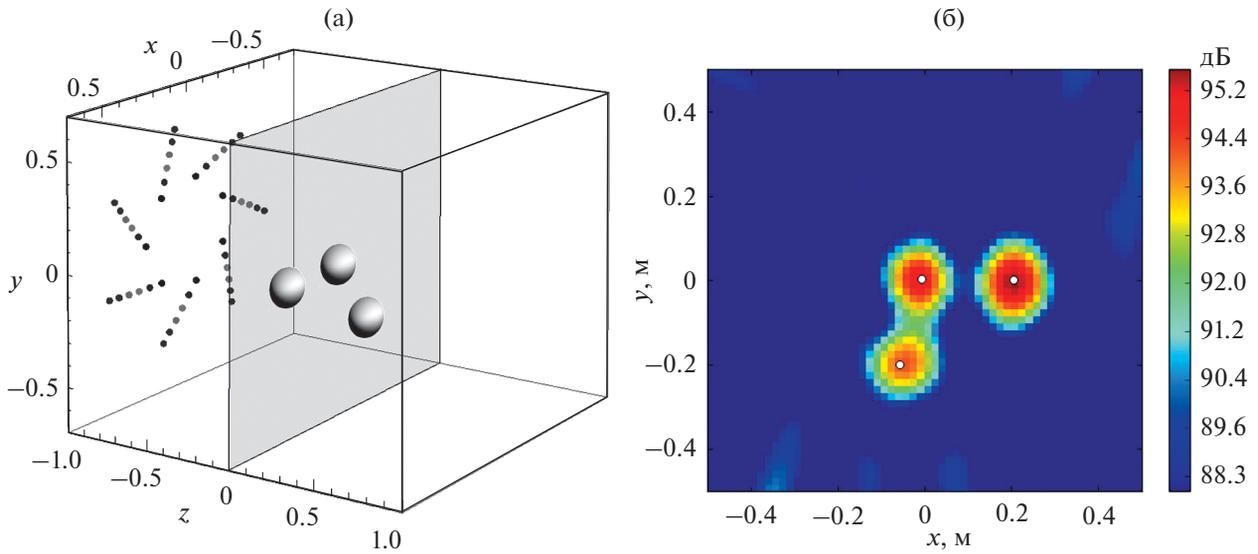


Рис. 2. Локализация монопольных источников (частота 2.5 кГц): (а) – положения микрофонной решетки и источников, (б) – карта локализации источников (линейный масштаб). Белыми точками показано реальное положение источников.

ШУМ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА

Для экспериментальной проверки разработанного алгоритма (валидации) в заглушенной камере АК-2 были проведены исследования шума обтекания цилиндра, при котором реализуются источники дипольного типа [33]. Исследовался шум, генерируемый цилиндром диаметром 5 мм, помещенным в турбулентную струю, истекающую из круглого сопла диаметром 40 мм со скоростью 100 м/с. Цилиндр располагался на расстоянии 250 мм вниз по потоку от среза сопла (рис. 5). Цилиндр можно было поворачивать вокруг оси струи, что позволяло исследовать его различные ориентации относительно плоской решетки микрофонов.

Азимутальная структура шума обтекания цилиндра детально исследовалась шестимикрофонной азимутальной решеткой в [33]. Было показано что *x*- и *y*-диполи, соответствующие пульсациям силы сопротивления и подъемной силы (рис. 6), доминируют в общем шуме в широком диапазоне частот (где шум цилиндра превышает шум струи). Можно использовать упрощенный двухмикрофонный вариант МАД, при котором в азимутальной решетке используется только два симметричных относительно ее центра микрофона. В этом случае сигналы, соответствующие продольному и поперечному диполям, могут быть найдены следующим образом

$$\begin{aligned}
 a_0(x, t) &\approx (p_1(x, t) + p_2(x, t))/2, \\
 a_1(x, t) &\approx (p_1(x, t) - p_2(x, t))/2.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Двухмикрофонная конфигурация МАД позволяет легко измерять симметричную и антисимметричную (относительно оси струи) компоненты звукового поля [34].

При измерении решеткой МАД цилиндр ориентировался перпендикулярно линии, соединяющей микрофоны (рис. 6). Как известно [33], поперечный *y*-диполь (мода *a*₁) преобладает в звуковом поле в окрестности максимума спектра (*St* ≈ 0.16). Для больших значений *x* (малый угол к оси струи) увеличивается вклад в полный сигнал продольного диполя (мода *a*₀), что объясняет

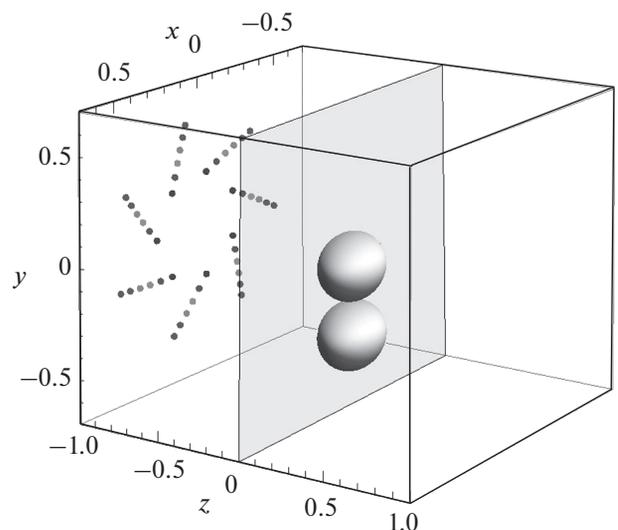


Рис. 3. Положение микрофонной решетки и модельного дипольного источника.

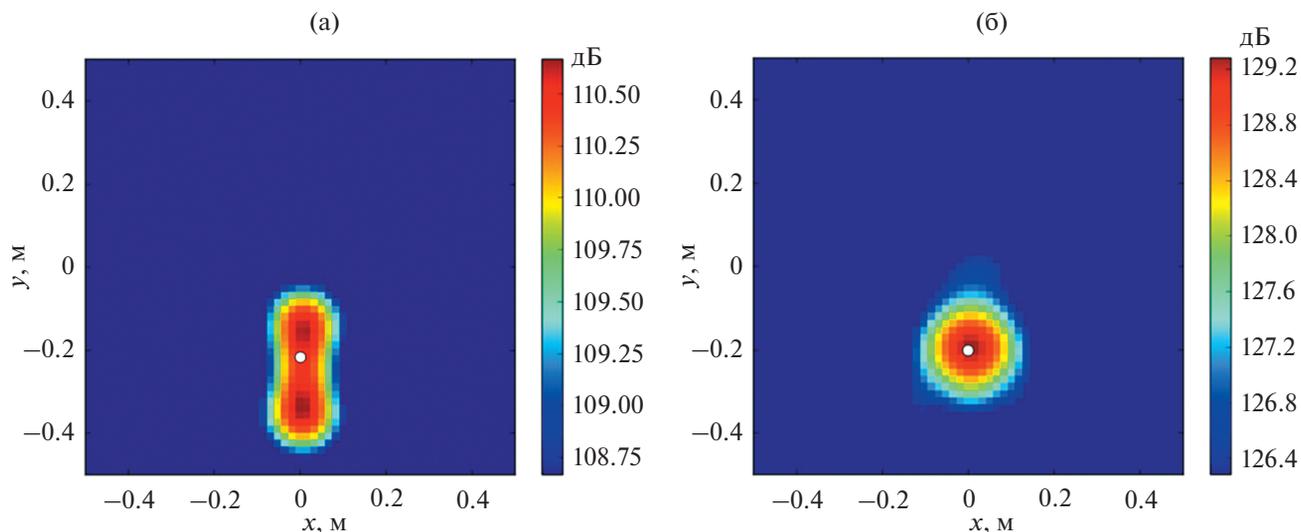


Рис. 4. Локализация дипольного источника (частота 3 кГц): (а) – карта локализации, полученная с помощью стандартного алгоритма СВ, (б) – карта локализации, полученная с помощью дипольного алгоритма СВ-D. Белыми точками показано реальное положение источника.

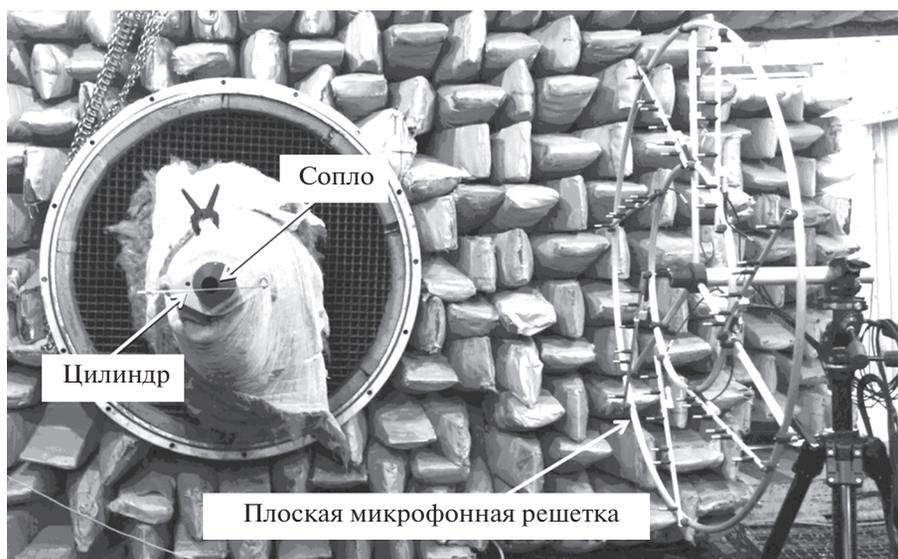


Рис. 5. Измерение шума обтекания цилиндра плоской решеткой Bruel&Kjaer.

ся характеристиками направленности источников. Для более точного выделения шума цилиндра в [33] из общего сигнала вычитался соответствующий вклад струи, полученный в измерениях без цилиндра в потоке. При используемых в эксперименте параметрах, шум струи оказался сравним с модой a_0 шума цилиндра в окрестности $x = 0$ и с модой a_1 шума цилиндра при больших x . Интенсивности излучения продольного и поперечного диполей для различных частот, полученные с помощью МАД и приведенные к расстоянию 1 м от источника, показаны на

рис. 7. Интенсивности рассчитаны в частотных полосах шириной 0.2 кГц. При числах Струхала выше ~ 0.2 размер источника становится сравним с длиной волны, и интерпретация данных МАД оказывается затруднительной в виду возрастающего влияния некомпактности источника. В низкочастотной области ($St < 0.06$) большая часть энергии звукового поля излучается в форме продольного диполя. В области средних частот ($St \sim 0.1-0.2$) излучение поперечного диполя мощнее более чем на 10 дБ излучения продольного диполя, которое в

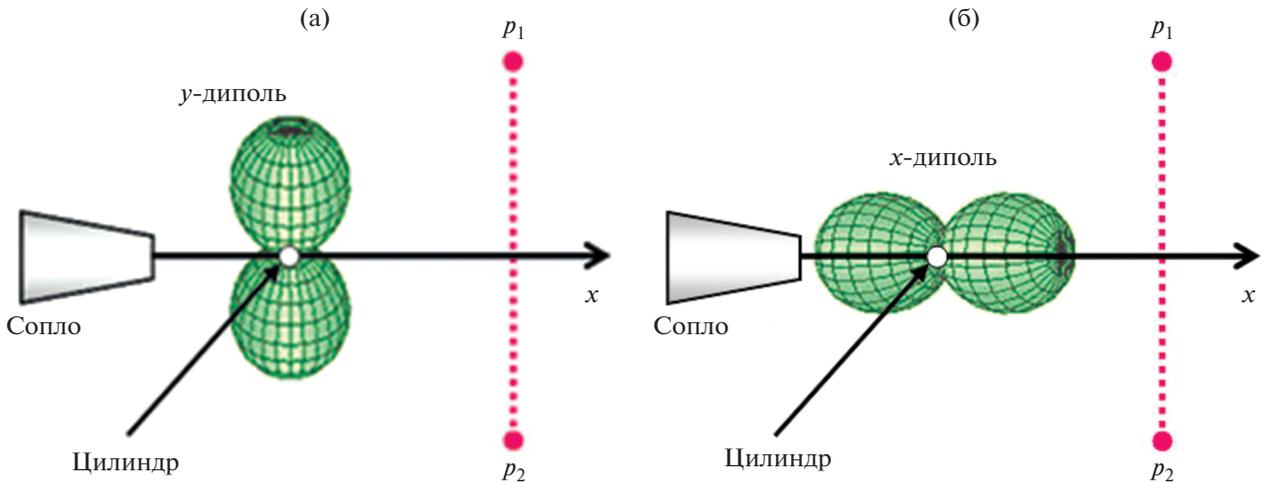


Рис. 6. Схема измерения составляющих шума обтекания цилиндра двухмикрофонной решеткой МАД: (а) – диполь, связанный с пульсациями подъемной силы (*y*-диполь), (б) – диполь, связанный с пульсациями силы сопротивления (*x*-диполь). Цилиндр располагается перпендикулярно плоскости рисунка.

этом частотном диапазоне оказывается ниже разрешающей способности системы.

Как видно из рис. 7, в диапазоне частот 0.9–1.1 кГц ($St = 0.04–0.06$) интенсивности обоих диполей сравнимы друг с другом: для *x*-диполя диагностика МАД дает величину 71.0 дБ и для *y*-диполя – величину 68.2 дБ. В диапазоне частот 2.9–3.1 кГц ($St = 0.14–0.16$), где доминирует *y*-диполь, связана с пульсацией подъемной силы, получена величина 81.0 дБ, продольный *x*-диполь для данного частотного диапазона не регистрируется, поскольку он более чем на 10 дБ слабее *y*-диполя. При этом речь идет о вкладе именно шума обтекания цилиндра, для получения которого вычитались соответствующие компоненты шума струи в отсутствие цилиндра.

При измерениях описанных выше диполей плоской решеткой, она выставлялась таким образом, что ее плоскость была параллельна оси струи, а расстояние от центра решетки до оси струи составляло 1 м. Ось решетки, проходящая перпендикулярно ее плоскости через центр, проходила через ось струи в месте расположения цилиндра. Для диапазона частот 2.9–3.1 кГц результаты локализации источника звука плоской решеткой показаны на рис. 8 для различных алгоритмов и ориентаций цилиндра.

В том случае, когда цилиндр располагается перпендикулярно плоскости решетки, монопольный алгоритм СВ, как и в рассмотренной ранее модельной задаче, приводит к некорректной локализации основного источника звука (рис. 8а). В то же время, дипольный алгоритм СВ-Д позволяет достаточно точно восстановить и положение источника – *y*-диполя – и его амплитуду (рис. 8б), ко-

торая менее чем на 1 дБ отличается от величины, определенной с помощью МАД. Продольный *x*-диполь для данного частотного диапазона не регистрируется, поскольку он примерно на 10 дБ слабее *y*-диполя. Отметим, что когда цилиндр параллелен решетке, монопольный алгоритм работает вполне корректно (рис. 8в), поскольку решетка находится в области максимума лепестка диаграммы направленности диполя, и амплитудно-фазовые характеристики излучения на ее микрофонах приемлемо описываются монопольным источником.

Для частотного диапазона 0.9–1.1 кГц результаты локализации плоской решеткой показаны

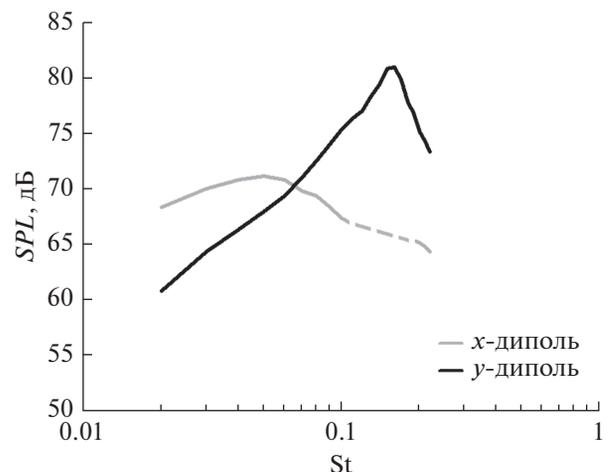


Рис. 7. Зависимость интенсивности излучения продольного и поперечного диполей от частоты, полученная с помощью МАД.

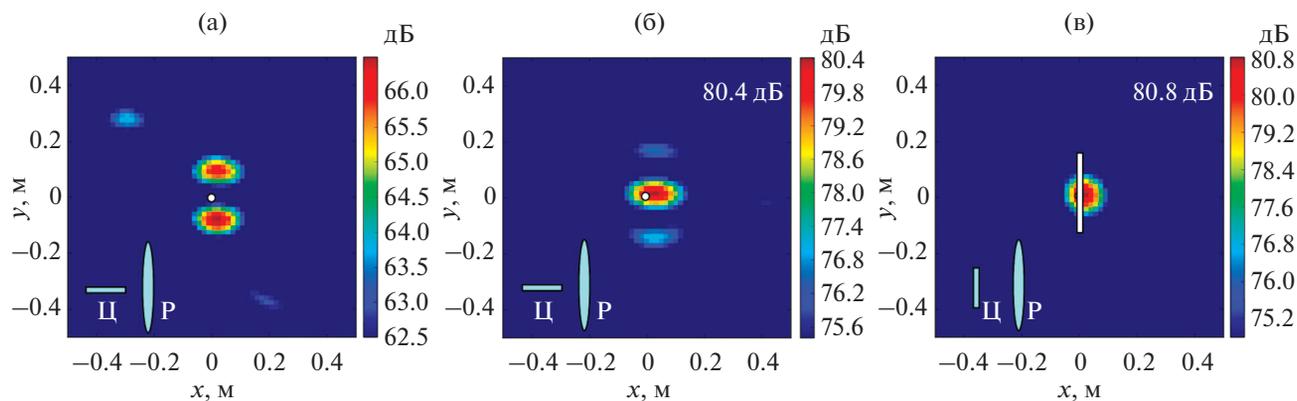


Рис. 8. Локализация источников шума обтекания цилиндра плоской решеткой микрофонов в диапазоне 2.9–3.1 кГц: (а) – алгоритм СВ, цилиндр (“Ц”) перпендикулярен решетке (“Р”); (б) – алгоритм СВ-D, цилиндр перпендикулярен решетке, локализация y -диполя; (в) – алгоритм СВ, цилиндр параллелен решетке. Взаимное расположение цилиндра и решетки отмечено на каждой карте в левом нижнем углу. В верхнем углу приведена величина измеренного диполя для сравнения с результатами МАД.

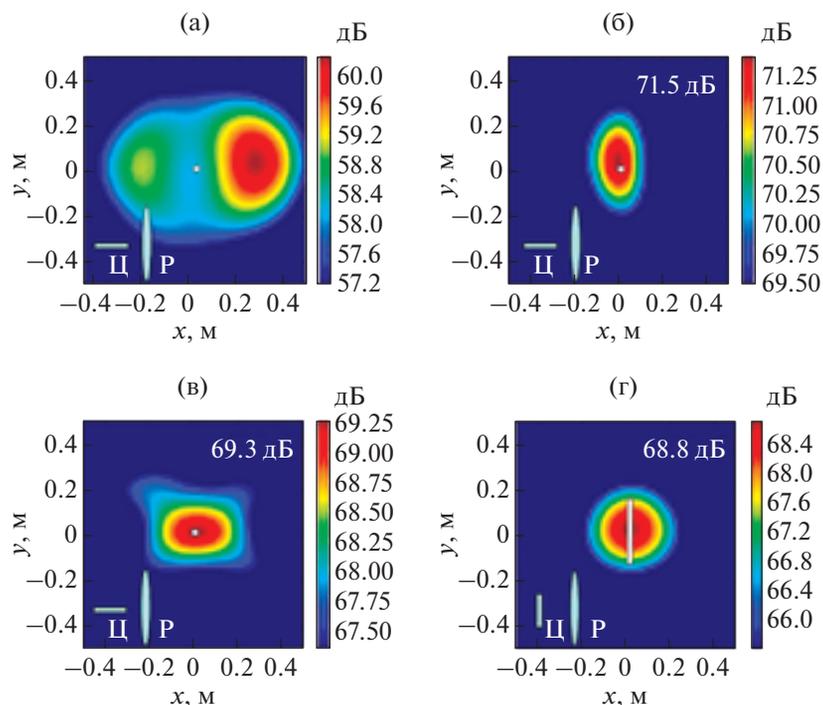


Рис. 9. Локализация источников шума обтекания цилиндра плоской решеткой микрофонов в диапазоне 0.9–1.1 кГц: (а) – алгоритм СВ, цилиндр перпендикулярен решетке; (б) – алгоритм СВ-D, цилиндр перпендикулярен решетке, локализация x -диполя; (в) – алгоритм СВ-D, цилиндр перпендикулярен решетке, локализация y -диполя; (г) – алгоритм СВ, цилиндр параллелен решетке.

на рис. 9 для различных алгоритмов и ориентаций цилиндра. В том случае, когда цилиндр располагается перпендикулярно плоскости решетки, монополярный алгоритм СВ снова приводит к некорректной локализации основного источника звука (рис. 9а), поскольку решетка находится в зоне

скачка фазы, который не может быть смоделирован некоррелированными монополями.

Дипольный алгоритм СВ-D позволяет восстановить одновременно характеристики обоих дипольных источников – y -диполя и x -диполя (рис. 9б, 9в) – в том случае, когда цилиндр пер-

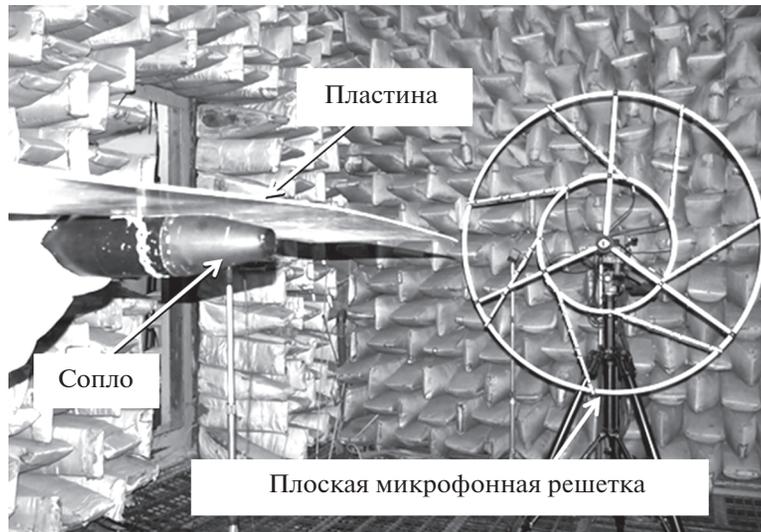


Рис. 10. Измерение шума взаимодействия струи и пластины плоской решеткой Bruel&Kjaer.

пендикулярен решетке. Эти характеристики оказываются близки (с отклонением порядка 1 дБ) к полученным с помощью МАД. На рис. 9г показан результат работы монопольного алгоритма для случая, когда цилиндр параллелен плоскости решетки. Как видно, монопольный алгоритм позволяет локализовать поперечный y -диполь, однако не дает возможности идентифицировать продольный x -диполь, который в данном случае почти на 3 дБ интенсивнее поперечного. Таким образом, применение СВ-алгоритма для идентификации дипольных источников шума достаточно ограничено, и в большом числе случаев может приводить либо к полностью некорректной локализации источников, либо к частичной локализации лишь некоторых их компонент.

ШУМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ И ПЛАСТИНЫ

Рассмотрим источник звука, связанный со взаимодействием струи и пластины. Известно [35, 38], что струя, расположенная вблизи пластины, излучает намного больше шума в сравнении со свободной струей, причем акустическое поле, связанное с рассеянием на задней кромке пластины пульсаций ближнего поля струи, имеет в целом антисимметричный характер [35], близкий к дипольному. В данной работе рассматривалась простая конфигурация “сопло + пластина” (рис. 10), аналогичная исследованной ранее в работе [35, 39], для того чтобы исследовать возможности предложенного алгоритма диагностики дипольных источников. Пластина была установлена параллельно оси струи с параметрами $d = 3.15D$, $h = D$, где

$D = 40$ мм – диаметр сопла (рис. 11). Число Маха истечения струи было равно 0.4.

Для МАД диагностики рассеянного звукового поля, необходимой для валидации дипольного алгоритма СВ-D, использовались два противоположных микрофона, расположенных на линии, перпендикулярной плоскости пластины, для того чтобы обеспечить корректное разрешение дипольного источника (5) (рис. 11). Расположение решетки варьировалось в диапазоне $-0.5 \leq x \leq 2.5$ м, при $x = 0$ решетка находилась в плоскости среза сопла. Результаты проведенных измерений (рис. 12–13) дают возможность сравнить различные алгоритмы при измерениях плоской решеткой. Как видно, в боковом направлении в области низких частот доминирует антисимметричная

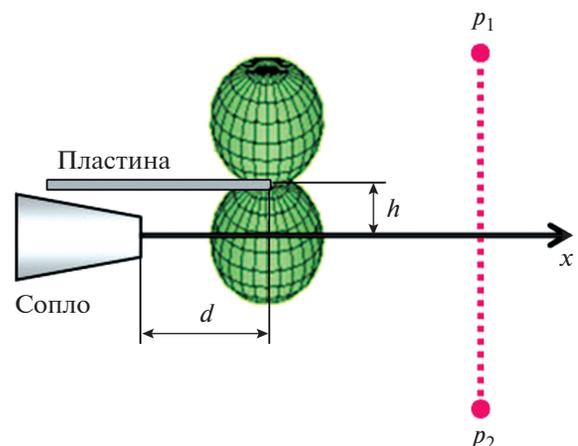


Рис. 11. Схема измерения шума взаимодействия струи и пластины двухмикрофонной решеткой МАД.

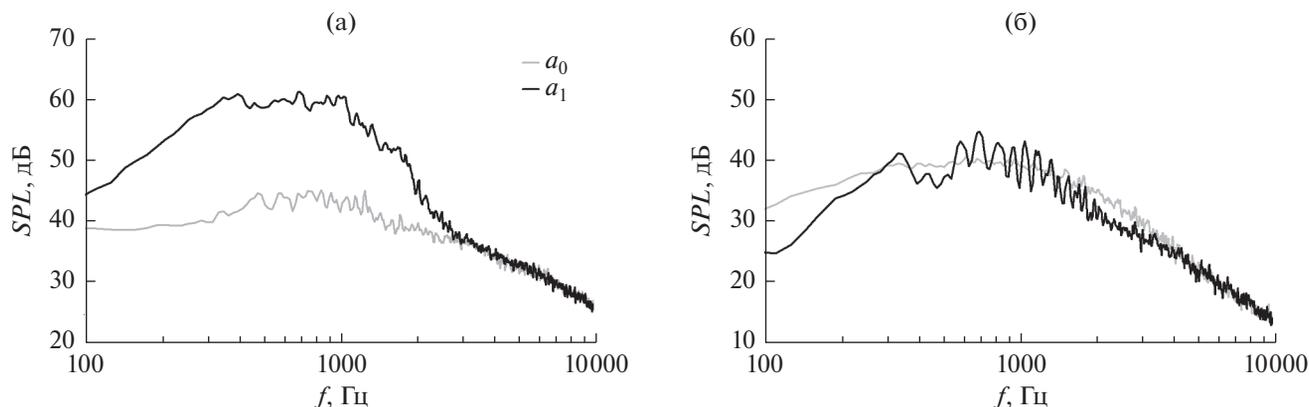


Рис. 12. Спектры симметричной a_0 и антисимметричной a_1 мод шума струи и пластины для разных положений решетки МАД: (а) $-x = 0.125$ (соответствует задней кромке пластины), (б) $-x = 2.0$ м.

мода (рис. 12а), а в области малых углов к оси струи ее вклад сравнивается с вкладом симметричной моды. Азимутальные моды определялись в соответствии с формулой (5). Направленности мод в области спектрального максимума показаны на рис. 13. Симметричная мода a_0 соответствует шуму струи [35], а антисимметричная a_1 — шуму взаимодействия. При этом, как и ожидалось, направленность моды a_1 близка к дипольной. Параметры модельного диполя, соответствующие измерениям, дают величину $L = 83.0$ дБ при его положении в точке $x = -0.1$ м. Нужно отметить, что поскольку хорда пластины сравнима с длиной волны, направленность шума взаимодействия несколько отличается от направленности точечного диполя [39, 40], поэтому используемая в настоящей работе упрощенная аппроксимация мо-

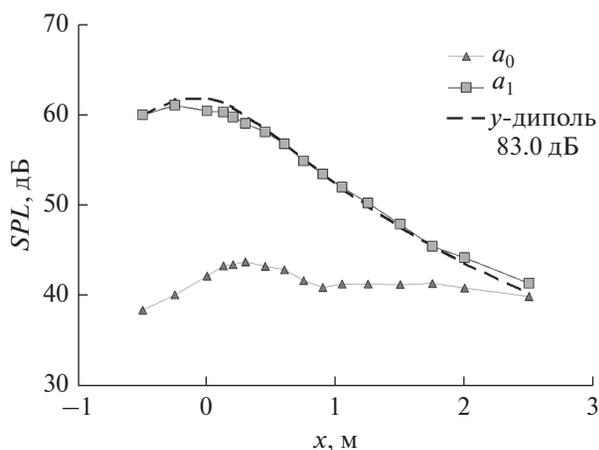


Рис. 13. Распределение интенсивности азимутальных мод на цилиндрической поверхности, окружающей источник, частотная полоса 0.5–0.7 кГц. Пунктирная линия соответствует направленности точечного диполя интенсивностью 83 дБ.

жет приводить к некоторым неточностям в определении интенсивности источника и его расположения.

Измерения плоской решеткой проводились для случая, когда пластина располагалась перпендикулярно плоскости решетки (рис. 13). Ось решетки совмещалась с задней кромкой пластины, расстояние от плоскости решетки до оси струи составляло 1 м. Результаты локализации плоской решеткой в том же диапазоне частот представлены на рис. 14.

В целом, результаты аналогичны полученным выше для шума цилиндра. Обработка данных стандартным алгоритмом СВ приводит к некорректному отображению положения источника и его интенсивности (рис. 14а). Результаты применение нового алгоритма СВ-D показаны на рис. 14б. Как видно, в этом случае источник локализуется в плоскости пластины, и его интенсивность составляет около 85.8 дБ. Однако локализация по продольной координате не вполне точна: источник, распознаваемый решеткой, оказывается вытянутым вверх по потоку от задней кромки пластины, хотя, как показывают теоретические оценки [35, 38], он должен быть локализован в области задней кромки пластины. Это может быть связано с тем, что, как отмечалось выше, направленность шума взаимодействия имеет вид кардиоиды, которая излучает вверх по потоку больше, чем точечный диполь схожей интенсивности. Этим же обстоятельством может объясняться различие в 2.8 дБ в определении интенсивности источника по сравнению с МАД. Тем не менее, использование дипольного алгоритма для плоской решетки в данном случае предпочтительнее стандартного монополярного, поскольку позволяет существенно уточнить локализацию

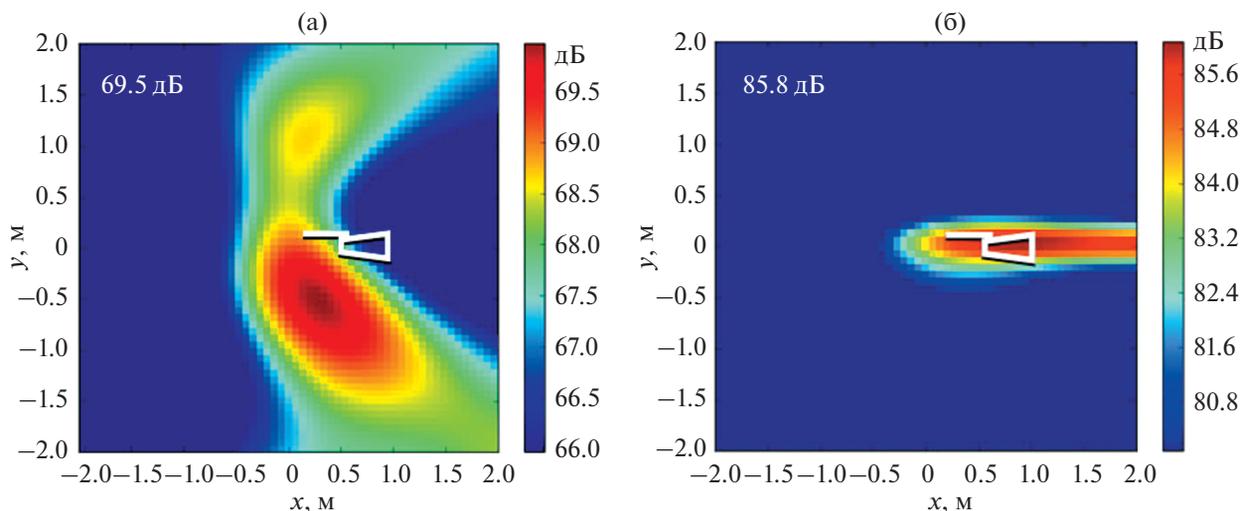


Рис. 14. Локализация источника шума взаимодействия струи и пластины с помощью плоской микрофонной решетки в полосе частот 0.5–0.7 кГц: (а) – монопольный алгоритм СВ, (б) – дипольный алгоритм СВ-D. Белыми линиями схематично показано положение сопла и пластины.

источника и адекватно оценить его интенсивность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе реализован классический алгоритм локализации источников шума на основе совокупности некоррелированных монопольных источников (СВ) и новый алгоритм (СВ-D), позволяющий локализовать дипольные источники шума. На модельных примерах и данных эксперимента по шуму обтекания цилиндра и шуму взаимодействия струи и пластины показано, что стандартный алгоритм СВ приводит к некорректной идентификации дипольных источников шума, дипольные моменты которых параллельны плоскости микрофонной решетки. В то же время разработанный алгоритм СВ-D позволяет корректно определять положение и интенсивность дипольных источников шума, в том числе разделять некоррелированные диполи сравнимых амплитуд с взаимно ортогональными дипольными моментами.

При измерении плоскими решетками напрямую решается задача локализации источников по амплитудно-фазовым характеристикам измеренных сигналов, что требует значительного числа микрофонов для получения приемлемой точности. При этом плоские решетки оказываются универсальными с точки зрения удобства их использования и структуры сканируемых источников. В отличие от плоских решеток, применительно к задаче локализации источников шума

применение МАД ограничено лабораторными условиями и маломасштабными установками, поскольку на натуральных объектах и открытых стендах использовать такие решетки затруднительно [34]. Кроме того, если источники звука распределены сложным образом и не располагаются на одной линии (оси решетки), то локализовать их с помощью МАД затруднительно, поскольку нарушится взаимно-однозначное соответствие между азимутальными модами и источниками шума [35].

Таким образом, в практически важных случаях исследований сложных источников шума более предпочтительным является использование плоских микрофонных решеток. Азимутальные решетки могут применяться в более простых ситуациях для детального исследования структуры отдельных источников. При этом они обеспечивают высокую точность измерений, результаты которых можно использовать, например, для валидации различных вариантов алгоритмов работы плоских решеток, как это делалось в настоящей работе.

Авторы выражают благодарность В.Ф. Копьеву за постановку задачи и полезные замечания. Эксперименты со струей и пластиной выполнены в рамках проекта “ОРИНОКО-2” Министерства промышленности и торговли РФ как части проекта ARTEM (грант № 769350) программы Horizon 2020. Анализ методов локализации источников шума проведен в рамках госзадания, выполняемого научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (регистрационный номер 9.3480.2017/ПЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dougherty R.P.* Beamforming in acoustic testing // Aeroacoustic Measurements. Springer, Berlin, Heidelberg. 2002. P. 62–97.
2. *Sijtsma P.* Experimental techniques for identification and characterisation of noise sources, Published // Advances in Aeroacoustics and Applications, VKI Lecture Series 2004–05, Ed. by *Anthoine J. and Hirschberg A.*, 2004.
3. *Merino-Martínez R.* Microphone arrays for imaging of aerospace noise sources // PhD Thesis, Technische Universiteit Delft. 2018.
4. *Liu Y., Quayle A., Dowling A., Sijtsma P.* Beamforming correction for dipole measurement using two-dimensional microphone arrays // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 124. № 1. P. 182–191.
5. *Ravetta P., Burdisso R., Ng W.* Wind tunnel aeroacoustic measurements of a 26%-scale 777 main landing gear // AIAA Paper. 2004. AIAA 2004–2885.
6. *Dougherty R., Podboy G.* Improved phased array imaging of a model jet // AIAA Paper. 2009. AIAA 2009–3186.
7. *Kopiev V., Zaytsev M.* Application of beamforming to jet/flap interaction noise // 5th Berlin Beamforming Conference. 2014. BeBeC-2014-24.
8. *Porteous R., Prime Z., Doolan C., Moreau D., Valeau V.* Three-dimensional beamforming of dipolar aeroacoustic sources // J. Sound Vib. 2015. V. 355. P. 117–134.
9. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Беляев И.В.* Исследование шума обтекания крупномасштабной модели крыла с механизацией // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 1. С. 95–105.
10. *Ershov V.V., Palchikovskiy V.V.* Comparison of beamforming algorithms based on localization of calibrating sound sources and air jet noise // Int. J. Engineering and Technology (UAE). 2018. V. 7. № 2. P. 119–123.
11. *Dougherty R., Mendoza J.* Phased array beamforming with 100-foot polar arc microphones in a static engine noise test // AIAA Paper. 2008. AIAA 2008–51.
12. *Dougherty R., Mendoza J.* Nacelle in-duct beamforming using modal steering vectors // AIAA Paper. 2008. AIAA 2008–2812.
13. *Siller H., Bassetti A., Davies S., Funke S.* Investigation of the noise emission of the V2500 engine of an A320 aircraft during ground tests with a line array and SO-DIX // 5th Berlin Beamforming Conference. 2014. BeBeC-2014-18.
14. *Van Komen D.F., Neilsen T.B., Harker B.M., Gee K.L., Swift S.H., Downing M., James M., Wall A.T.* Localization of directional noise sources from high-performance military aircraft through subarray beamforming analysis // J. Acoust. Soc. Am. 2018. V. 144. № 3. P. 1671.
15. *Michel U., Barsikow B., Helbig J., Hellmig M., Schuettpelz M.* Flyover noise measurements on a landing aircraft with a microphone array // AIAA Paper. 1998. AIAA 98–2336.
16. *Piet J., Michel U., Bohning P.* Localization of the acoustic sources of the A340 with a large phased microphone array during flight tests // AIAA Paper. 2002. AIAA 2002–2506.
17. *Fleury V., Malbéqui P.* Slat noise assessment from Airbus A340 flyover phased-array microphone measurements // AIAA J. 2013. V. 51. № 7. P. 1667–1674.
18. *Merino-Martínez R., Snellen M., Simons D.G.* Functional beamforming applied to imaging of flyover noise on landing aircraft // J. Aircraft. 2016. V. 53. № 6. P. 1830–1843.
19. Приложение 16. Охрана окружающей среды. Т. I. Авиационный шум. Издание 7. ICAO 2014.
20. *Billingsley J., Kinns R.* The acoustic telescope // J. Sound Vib. 1976. V. 48. P. 485–510.
21. *Christensen J.J., Hald J.* Beamforming // Technical Review. 2004. № 1. P. 1–49.
22. *Veggeberg K., James M.* Development of a large-scale microphone array for aircraft jet plume noise source characterization // SAE Technical Paper. 2011. № 2011–01–1733.
23. *Curle N.* The influence of solid boundaries on aerodynamic sound // Proc. Royal Soc. A. 1955. V. 231. № 1187. P. 505–514.
24. *Lighthill M.J.* On sound generated aerodynamically: I. General theory // Proc. Royal Soc. A. 1952. V. 211. № 1107. P. 564–581.
25. *Sijtsma P.* Acoustic array corrections for coherence loss due to the wind tunnel shear layer // 2nd Berlin Beamforming Conference. 2008. BeBeC-2008-15.
26. *Sijtsma P., Oerlemans S., Holthusen H.* Location of rotating sources by phased array measurements // AIAA Paper. 2001. AIAA 2001–2167.
27. *Sijtsma P.* Beamforming on moving sources // NLR Technical Report. 2006. NLR-TP-2006-733.
28. *Juve D., Sunyach M., Comte-Bellot G.* Filtered azimuthal correlations in the acoustic far field of a subsonic jet // AIAA Journal. 1979. V. 17. № 1. P. 112–114.
29. *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.
30. *Kopiev V.* Azimuthal decomposition of turbulent jet noise and its role for diagnostic of noise sources // Advances in Aeroacoustics and Applications, VKI Lecture Series 2004–05, Ed. by *Anthoine J. and Hirschberg A.*, 2004.
31. *Suzuki T.* Identification of multipole noise sources in low Mach number jets near the peak frequency // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119. № 6. P. 3649–3659.
32. *Cavaliere A.V.G., Jordan P., Colonius T., Gervais Y.* Axisymmetric superdirectivity in subsonic jets // J. Fluid Mech. 2012. V. 704. P. 388–420.
33. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф.* Механизм излучения звука турбулентностью вблизи твердого тела // Известия РАН МЖГ. 2008. № 1. С. 98–109.
34. *Faranosov G., Belyaev I., Kopiev V., Zaytsev M., Alek-sentsev A., Bersenev Y., Chursin V., Viskova T.* Adapta-

- tion of the azimuthal decomposition technique to jet noise measurements in full-scale tests // *AIAA Journal*. 2017. V. 55. № 2. P. 572–584.
35. *Faranosov G., Belyaev I., Kopiev V., Vyckov O.* Azimuthal structure of low-frequency noise of installed jet // *AIAA Journal*. 2019. V. 57. № 5. P. 1885–1898.
36. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Копьев В.А., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А.* Использование акустических характеристик коронного разряда для диагностики его свойств // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 4. С. 424–430.
37. *Ильин В.А., Ким Г.Д.* Линейная алгебра и аналитическая геометрия. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 320 с.
38. *Sarradj E.* A generic approach to synthesize optimal array microphone arrangements // 6th Berlin Beamforming Conference. 2016. BeBeC–2016–S4.
39. *Бычков О.П., Фараносов Г.А.* Экспериментальное исследование и теоретическое моделирование шума взаимодействия струи и крыла самолета // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 4. С. 437–453.
40. *Cavalieri A.V.G., Jordan P., Agarwal A., Gervais Y.* Jittering wave-packet models for subsonic jet noise // *J. Sound Vibr.* 2011. V. 330. P. 4474–4492.