

УДК 534.21, 534.874, 534.23, 534.6.08

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОМИКРОФОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2022 г. М. А. Демьянов^{a, b, *}

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

^bМосковский физико-технический институт,
пер. Институтский 9, Долгопрудный, Московская обл., 141700 Россия

*e-mail: demyanov@phystech.edu

Поступила в редакцию 16.05.2022 г.

После доработки 01.07.2022 г.

Принята к публикации 05.07.2022 г.

Разработан метод определения поля источников по данным многомикروفонных измерений, основанный на корреляционном анализе акустических полей. В предположении дельта-коррелированности поля источников, данный подход позволяет принципиально изменить математическую постановку обратной задачи таким образом, что задача становится корректно поставленной. В частности, данный метод дает возможность одновременно распознать монопольную и дипольную компоненты поля источников с помощью измерений плоской микروفонной решеткой. Метод верифицирован численно на различных тестовых примерах одновременного распознавания монопольной и дипольной составляющих поля источников.

Ключевые слова: микروفонные решетки, фазированная антенна, бимформинг источников сложной структуры, некоррелированные источники

DOI: 10.31857/S032079192206003X

ВВЕДЕНИЕ

Для идентификации источников звука в акустике используются методики, основанные на синхронных многомикروفонных измерениях [1]. Отдельно стоит выделить алгоритмы типа “бимформинг”, получившие широкое развитие применительно именно к задачам аэроакустики [2]. В классическом алгоритме Conventional Beamforming (CB) в качестве модели источников используются монополи. Такой выбор типа источников для обратной задачи нахождения амплитуд является целесообразным, если характеристики исследуемого звукового поля заранее не известны, а определить необходимо области генерации наиболее интенсивного излучения по отношению к позиции расположения микروفонной решетки. В ходе дальнейшего развития данного направления появились постановки задач, в рамках которых целесообразно разделять типы источников и рассматривать акустические источники сложной структуры [3–7]. В силу математической некорректности обратной задачи нахождения поля источников по индуцируемому звуковому полю [8], до сих пор не было адекватной естественной математической постановки, в рамках кото-

рой можно было бы рассмотреть объединенную модель источников, составленную из источников различного типа. Существующие алгоритмы имеют строгие ограничения применимости и обычно используют набор источников, ограниченных одним мультипольным типом [6, 7, 9]. В данной работе предложен новый теоретический подход для задачи определения поля амплитуд акустических источников. Основным достоинством предлагаемого метода является корректность обратной задачи. В частности, метод позволяет учитывать источники различного типа в единой модели источников. Особенностью данного метода является переход к рассмотрению корреляционных характеристик измеряемых акустических полей и индуцирующих их источников. При наложении на систему источников условия дельта-коррелированности, задача математически приобретает совершенно иные свойства, не присущие процессу, описываемому исходным волновым уравнением. Таким образом, оператор, фигурирующий в формулировке обратной задачи идентификации источников, перестает быть вырожденным. Данный подход позволил выделить в рамках задачи одновременного распознавания различные типы ис-

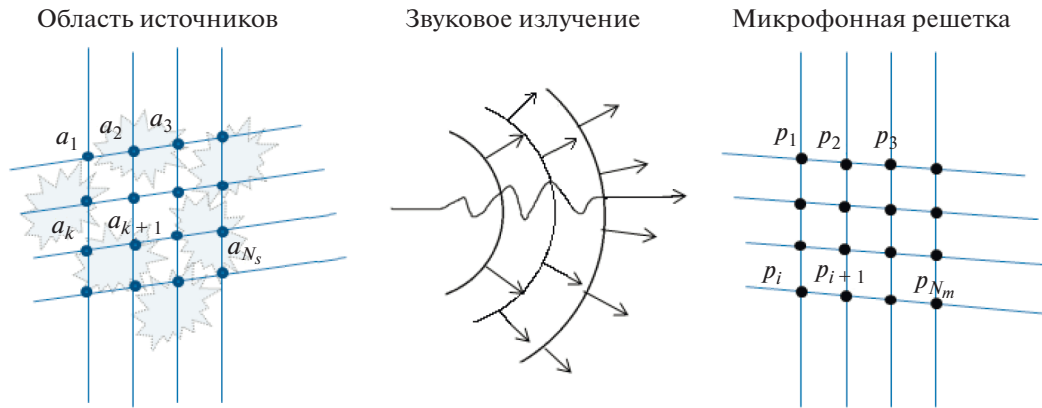


Рис. 1. Схема многомикрофонных синхронных измерений.

точников. Метод проверен на примере определения монопольной и дипольной компонент поля акустических источников и позволяет выделить обе компоненты с корректными значениями пространственного распределения амплитуд.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Рассмотрим схему микрофонных измерений звукового поля, распространяющегося из области генерации, где расположены предполагаемые источники звука (рис. 1).

Область, из которой исходит акустическое излучение, разбивается на дискретную сетку, каждому узлу которой сопоставляется источник с заранее неизвестной амплитудой a_k . Тогда Фурье-образ давления, индуцируемого на i -ом микрофоне решетки, представляется в виде:

$$p_i = \sum_{k=1}^{N_s} G_{ik} a_k, \tag{1}$$

где G_{ik} — сигнал, индуцируемый единичным источником, расположенным в k -ом узле сетки источников, на i -ом микрофоне (столбцы матрицы $G_{ik} = (q_1 | q_2 | \dots | q_{N_s})$ называются направляющими векторами, представляющими собой давления, индуцируемые соответствующими единичными звуковыми источниками, расположенными в узлах сетки источников, на микрофонах решетки).

Искать непосредственно численное решение системы (1) в прикладных задачах зачастую не является возможным. Подробный численный анализ условий на поле источников и геометрию микрофонной решетки, при которых система уравнений (1) является хорошо обусловленной, представлен в работе [10].

Рассмотрим спектральную матрицу $p_i p_j^*$, здесь $\overline{\quad}$ означает осреднение по реализациям:

$$\overline{p_i p_j^*} = \sum_{k=1, p=1}^{N_s} \overline{G_{ik} a_k a_p^* G_{jp}^*}. \tag{2}$$

Данное выражение в матричной форме принимает вид:

$$C = G A G^H, \tag{3}$$

где $\overline{C_{ij}} = \overline{p_i p_j^*}$, $\overline{A_{kp}} = \overline{a_k a_p^*}$.

Для нахождения положений источников в пространстве и корреляционных соотношений

между ними (в частности, их амплитуд) необходимо решить матричное уравнение (3). Для этого удобно воспользоваться техникой кронекеровского произведения матриц [11]. В таком случае система примет вид:

$$\tilde{C} = (G \otimes G^*) \tilde{A}, \tag{4}$$

где

$$\tilde{C} = \begin{pmatrix} \overline{|p_1|^2} \\ p_1 p_2^* \\ \vdots \\ \overline{p_1 p_{N_m}^*} \\ p_2 p_1^* \\ \overline{|p_2|^2} \\ \vdots \\ p_2 p_{N_m}^* \\ \vdots \\ p_{N_m} p_1^* \\ \vdots \\ \overline{|p_{N_m}|^2} \end{pmatrix}, \quad \tilde{A} = \begin{pmatrix} \overline{|a_1|^2} \\ a_1 a_2^* \\ \vdots \\ \overline{a_1 a_{N_s}^*} \\ a_2 a_1^* \\ \overline{|a_2|^2} \\ \vdots \\ \overline{a_2 a_{N_s}^*} \\ \vdots \\ a_{N_s} a_1^* \\ \vdots \\ \overline{|a_{N_s}|^2} \end{pmatrix},$$

$$G \otimes G^* = \begin{pmatrix} G_{11} G_{11}^* & G_{11} G_{12}^* & \cdots & G_{11} G_{1N_s}^* & G_{12} G_{11}^* & G_{12} G_{12}^* & \cdots & G_{12} G_{1N_s}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{11}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{1N_s}^* \\ G_{11} G_{21}^* & G_{11} G_{22}^* & \cdots & G_{11} G_{2N_s}^* & G_{12} G_{21}^* & G_{12} G_{22}^* & \cdots & G_{12} G_{2N_s}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{21}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{2N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{11} G_{N_m 1}^* & G_{11} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{11} G_{N_m N_s}^* & G_{12} G_{N_m 1}^* & G_{12} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{12} G_{N_m N_s}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{N_m 1}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{N_m N_s}^* \\ G_{21} G_{11}^* & G_{21} G_{12}^* & \cdots & G_{21} G_{1N_s}^* & G_{22} G_{11}^* & G_{22} G_{12}^* & \cdots & G_{22} G_{1N_s}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{11}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{1N_s}^* \\ G_{21} G_{21}^* & G_{21} G_{22}^* & \cdots & G_{21} G_{2N_s}^* & G_{22} G_{21}^* & G_{22} G_{22}^* & \cdots & G_{22} G_{2N_s}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{21}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{2N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{21} G_{N_m 1}^* & G_{21} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{21} G_{N_m N_s}^* & G_{22} G_{N_m 1}^* & G_{22} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{22} G_{N_m N_s}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{N_m 1}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{N_m N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N_m 1} G_{11}^* & G_{N_m 1} G_{12}^* & \cdots & G_{N_m 1} G_{1N_s}^* & G_{N_m 2} G_{11}^* & G_{N_m 2} G_{12}^* & \cdots & G_{N_m 2} G_{1N_s}^* & \cdots & G_{N_m N_s} G_{11}^* & \cdots & G_{N_m N_s} G_{1N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N_m 1} G_{N_m 1}^* & G_{N_m 1} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{N_m 1} G_{N_m N_s}^* & G_{N_m 2} G_{N_m 1}^* & G_{N_m 2} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{N_m 2} G_{N_m N_s}^* & \cdots & G_{N_m N_s} G_{N_m 1}^* & \cdots & G_{N_m N_s} G_{N_m N_s}^* \end{pmatrix}.$$

Проблема некорректности обратной задачи определения поля источников по индуцируемому звуковому излучению остается и в данной постановке. Покажем, что при переходе к рассмотрению акустических полей, индуцируемых дельта-коррелированными полями источников, проблема некорректности исчезает.

Предполагая дельта-коррелированность источников (матрица амплитуд примет диагональный вид $A_{kp} = a_k a_p^* = \overline{a_k^2} \delta_{kp}$), соотношение (4) можно упростить, убрав большую часть соотношений, выражающих корреляции между различными источниками:

$$\tilde{C}_{\text{reduce}} = (G \otimes G^*)_{\text{reduce}} \tilde{A}_{\text{uncorrelated}} \tag{5}$$

где

$$\tilde{C}_{\text{reduce}} = \begin{pmatrix} \overline{|p_1|^2} \\ p_1 p_2^* \\ \vdots \\ p_1 p_{N_m}^* \\ \overline{|p_2|^2} \\ \vdots \\ p_2 p_{N_m}^* \\ \vdots \\ \overline{|p_{N_m}|^2} \end{pmatrix}, \quad \tilde{A}_{\text{uncorrelated}} = \begin{pmatrix} \overline{a_1^2} \\ \overline{a_2^2} \\ \vdots \\ \overline{a_{N_s}^2} \end{pmatrix},$$

$$(G \otimes G^*)_{\text{reduce}} = \begin{pmatrix} G_{11} G_{11}^* & G_{12} G_{12}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{1N_s}^* \\ G_{11} G_{21}^* & G_{12} G_{22}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{2N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{11} G_{N_m 1}^* & G_{12} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{1N_s} G_{N_m N_s}^* \\ G_{21} G_{21}^* & G_{22} G_{22}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{2N_s}^* \\ G_{21} G_{31}^* & G_{22} G_{32}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{3N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{21} G_{N_m 1}^* & G_{22} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{2N_s} G_{N_m N_s}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N_m 1} G_{N_m 1}^* & G_{N_m 2} G_{N_m 2}^* & \cdots & G_{N_m N_s} G_{N_m N_s}^* \end{pmatrix}.$$

Заметим, что в силу того, что спектральная матрица $p_i p_j^*$ эрмитова, в редуцированной матрице $(G \otimes G^*)_{\text{reduce}}$ помимо столбцов, соответствующих корреляции различных источников, также выброшена часть строк, отличающихся только комплексным сопряжением и не вносящих новой информации.

Полученная система уравнений (5) является квазилинейной, так как элементы $\tilde{A}_{\text{uncorrelated}}$ есть средние квадраты мощности источников и не могут быть отрицательными – это существенное обстоятельство, которое учитывается в процедуре нахождения неизвестных.

Система (5) имеет свойства, отличные от свойств исходной системы (4). Это позволяет корректно поставить задачу идентификации источников в конфигурациях (типы источников, область их расположения и геометрия микрофонной решетки), некорректных в рамках исходной системы для коррелированных источников. Отличие операторов, фигурирующих в задачах (4) и (5), наглядно видно на примере непрерывной мо-

дели, где не произведена дискретизация сеткой источников:

$$p(\mathbf{r}) = \int G(\mathbf{r}, \xi) a(\xi) d\xi, \quad (6)$$

$$\overline{p(\mathbf{r}_1) p^*(\mathbf{r}_2)} = \int G(\mathbf{r}_1, \xi_1) G^*(\mathbf{r}_2, \xi_2) \overline{a(\xi_1) a^*(\xi_2)} d\xi_1 d\xi_2, \quad (7)$$

$$\overline{p(\mathbf{r}_1) p^*(\mathbf{r}_2)} = \int G(\mathbf{r}_1, \xi) G^*(\mathbf{r}_2, \xi) \overline{|a(\xi)|^2} d\xi, \quad (8)$$

где $G(\mathbf{r}, \xi)$ – функция Грина, соответствующая типу источника.

Формула (6) представляет решение для волнового уравнения. Формула (7) – это уравнение для корреляций, прямое следствие волнового уравнения. Формула (8) описывает решение для дельта-коррелированного поля источников $\overline{a(\xi_1) a^*(\xi_2)} = |a(\xi_1)|^2 \delta(\xi_1 - \xi_2)$. Некоррелированные источники звука (8), в отличие от коррелированных источников (7), (8), не могут быть в совокупности не излучающими, так как энергия, переносимая акустическим полем через поверхность, охватывающую источники, равна сумме энергий излучения от каждого источника по отдельности, и может обнулится, только если источники будут отсутствовать вовсе:

$$\iint \overline{|p(\mathbf{r})|^2} dS = \iint \int |G(\mathbf{r}, \xi)|^2 \overline{|a(\xi)|^2} d\xi dS. \quad (9)$$

Если $\int \overline{|a(\xi)|^2} d\xi > 0$, то $\iint \overline{|p(\mathbf{r})|^2} dS > 0$.

Отметим также, что выражение (8) при дискретизации уравнения и введении сетки источников принимает следующий вид:

$$\overline{p_i p_j^*} = \sum_{k=1}^{N_s} G_{ik} G_{jk}^* \overline{|a_k|^2} = \sum_{k=1}^{N_s} \overline{|a_k|^2} (q_k q_k^H)_{ij}.$$

Заметим, что корреляционный метод имеет возможность масштабирования по независимым микрофонным измерениям [12]. Для этого достаточно при формировании матриц \tilde{C} и $(G \otimes G^*)$ системы блоки, соответствующие различным измерениям, выписывать друг под другом:

$$\begin{pmatrix} \tilde{C}^1 \\ \tilde{C}^2 \\ \vdots \\ \tilde{C}^{N_{\text{pos}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (G \otimes G^*)^1 \\ (G \otimes G^*)^2 \\ \vdots \\ (G \otimes G^*)^{N_{\text{pos}}} \end{pmatrix} \tilde{A}.$$

Для метода с некоррелированными источниками:

$$\begin{pmatrix} \tilde{C}_{\text{reduce}}^1 \\ \tilde{C}_{\text{reduce}}^2 \\ \vdots \\ \tilde{C}_{\text{reduce}}^{N_{\text{pos}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (G \otimes G^*)_{\text{reduce}}^1 \\ (G \otimes G^*)_{\text{reduce}}^2 \\ \vdots \\ (G \otimes G^*)_{\text{reduce}}^{N_{\text{pos}}} \end{pmatrix} \tilde{A}_{\text{uncorrelated}}.$$

Стоит отметить еще, что постановка задачи с некоррелированными источниками корректно описывает и случаи, когда источники являются коррелированными, но масштаб их корреляции меньше разрешающей способности микрофонной решетки – в таком случае звуковое поле неотлично от поля дельта-коррелированных источников с направленностью такой же, как у отдельной когерентной структуры. В частности, это условие выполнено для компактных (характерный масштаб меньше длины волны) звуковых источников. При малых числах Маха ($M^2 \ll 1$) характерная длина излучаемой волны много больше размера вихревой зоны и возникающие источники можно считать компактными. Таким образом, при малых числах Маха дозвуковые аэродинамические источники шума могут быть корректно описаны в рамках предложенной парадигмы.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО НАХОЖДЕНИЯ АМПЛИТУД ИСТОЧНИКОВ

Для упрощения записи, в данном разделе введены собственные обозначения, не связанные с другими частями статьи.

Для линейных систем вида $Ax = b$ с учетом того, что правая часть предполагается заданной с погрешностями, так как измерена в эксперименте, разумно искать решение как минимум выражения:

$$\|Ax - b\|_2 \xrightarrow{x} \min. \tag{10}$$

Решение задачи минимизации (10) эквивалентно решению линейной системы:

$$A^H Ax = A^H b. \tag{11}$$

Решение системы (11) можно искать с помощью метода сопряженных градиентов [13]:

$$\frac{1}{2}(c^H x + x^H c) + \frac{1}{2}x^H Gx \xrightarrow{x} \min, \tag{12}$$

где $G = A^H A$, $c = A^H b$.

Итерационная схема решения выглядит следующим образом:

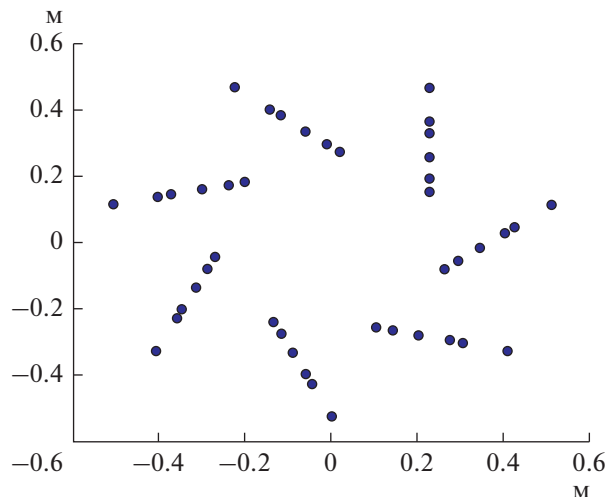


Рис. 2. Координаты микрофонов виртуальной плоской микрофонной решетки (оси представлены в метрах).

$$p_k = -g_k + \beta_k p_{k-1}, \quad \alpha_k = \frac{\|g_k\|_2^2}{p_k^H G p_k}, \tag{13}$$

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k, \quad g_k = c + Gx_k, \quad \beta_k = \frac{\|g_k\|_2^2}{\|g_{k-1}\|_2^2}.$$

При этом для компонент x_{k+1} применяется дополнительная процедура, связанная с неотрицательностью средних квадратов амплитуд. Если в процессе итераций появлялись отрицательные компоненты x_{k+1} , то у них изменяется знак на противоположный:

$$\text{если } x_{k+1}^i < 0 \rightarrow x_{k+1}^i = -x_{k+1}^i, \quad i = \overline{1, N_s}. \tag{14}$$

В качестве стартовой точки алгоритма были выбраны значения:

$$\beta_0 = 0, \quad g_0 = c.$$

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА

Верификация разработанного метода проводилась численно на модельных примерах идентификации взаимно некоррелированных источников, для этого в модель были одновременно заложены и монополь и диполь. Расположение источников моделировалось в плоскости, параллельной плоскости микрофонной решетки. Координаты источников, используемые для распознавания источников, изображены на рис. 2. Данная микрофонная решетка является виртуальным образом реальной микрофонной решетки, имеющейся в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ.

Источники, располагающиеся в различных узлах сетки источников, предполагаются некоррелированными. При этом в каждом узле располагаются 3 типа источников, также не коррелированные

между собой, — монополь и две дипольные компоненты, ориентированные в плоскости источников:

$$\begin{aligned} G_{kl}^1 &= \frac{e^{ik|r_k^m - r_l^s|}}{|r_k^m - r_l^s|}, \\ G_{kl}^2 &= \frac{(r_k^m - r_l^s)_x e^{ik|r_k^m - r_l^s|}}{|r_k^m - r_l^s|^2} \left(ik - \frac{1}{|r_k^m - r_l^s|} \right), \\ G_{kl}^3 &= \frac{(r_k^m - r_l^s)_y e^{ik|r_k^m - r_l^s|}}{|r_k^m - r_l^s|^2} \left(ik - \frac{1}{|r_k^m - r_l^s|} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где G_{kl}^1 — монополь, G_{kl}^2 — x -диполь, G_{kl}^3 — y -диполь (предполагается, что источники расположены в плоскости XY), r_k^m — координата k -го микрофона, r_l^s — координата l -го узла сетки источников.

При формировании спектральной матрицы

$C_{ij} = p_i p_j^*$ свойство некоррелированности источников моделировалось с помощью многократных реализаций с различными случайными фазами между всеми источниками. Конкретно в приведенных примерах было рассмотрено 150 реализаций.

Плоскость источников располагалась на расстоянии 1 м от плоскости микрофонной решетки.

Далее приводятся карты локализации источников на частоте 1000 Гц. Моделировалась пара источников — монополь и x -диполь. Монополь располагался в позиции $(-0.25, 0)$, x -диполь в позиции $(0.2, -0.2)$. Представлены 3 случая: одновременное моделирование монополя и диполя (входные данные — акустические поля от некоррелированных монополя и диполя), моделируется отдельно монополь (входные данные — акустическое поле монополя), моделируется отдельно диполь (входные данные — акустическое поле диполя).

Результаты локализации источников точно соответствуют заданным численным значениям. При этом для дипольной компоненты (как видно из рис. 3а, 3б) динамический диапазон для данной конфигурации составил ~ 6 дБ. При удалении из моделирования x -диполя соответствующий уровень интенсивности поля x -диполей уменьшился на ~ 9 дБ (рис. 3а, 3г, 3ж). При удалении монополя уровень интенсивности поля монополей уменьшился на ~ 12 дБ (рис. 3в, 3е, 3и).

Моделировалась также конфигурация источников, с тем же пространственным расположением, но с отличной амплитудой диполя — увеличенной в 3 раза (рис. 4).

Метод позволяет корректно распознать и монополь, и диполь при таком соотношении ампли-

туд. При этом, если судить по акустической карте для y -диполя, динамический диапазон составляет ~ 10 дБ относительно доминирующего дипольного источника.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДА

Для проверки возможности использования метода в реальном эксперименте было проведено исследование его устойчивости. Сначала было рассмотрено влияние неточности в задании волнового числа $k = \omega/c$. Для этого в качестве входных данных использовалось неверное значение скорости звука в среде c . Источники моделировались с $c = 330$ м/с. В реализованном алгоритме использовалось $c = 340$ м/с. Конфигурация источников использовалась та же, что на рис. 3. Сравнение результатов с корректным и неточным значениями волнового числа приведены на рис. 5.

Умеренное изменение волнового числа k не приводит к сильному искажению выводимой акустической карты. На рис. 5 видно, что локализация и значения амплитуд монопольного и дипольного источников почти не изменились. Если судить по компоненте y -диполя, который отсутствует при моделировании источников, то уровень динамического диапазона уменьшился на 1 дБ.

Исследовалось также влияние неточности задания положения плоскости источников по отношению к микрофонной решетке (рис. 6). Для этого положение плоскости локализации источников при обработке было параллельно смещено на 2 см от действительного. В этом случае рассмотрена конфигурация источников, где диполь имеет увеличенную в 3 раза амплитуду. Таким образом, амплитуда моделируемого диполя не пропала на фоне ошибок. Это связано с тем, что по структуре направленности диполя, микрофонная решетка находится в области минимума его акустического излучения и монополь доминирует по уровню индуцируемых на микрофонах сигналов.

Динамический диапазон упал с ~ 10 до ~ 4 дБ. Метод достаточно чувствителен к точности задания области расположения акустических источников при построении сетки источников, по крайней мере, в рассмотренной конфигурации микрофонной решетки, типов источников и области их локализации. Возможно, использование трехмерной микрофонной решетки [9, 12, 14] позволит улучшить качество идентификации и увеличит динамический диапазон, так как будет охватывать максимумы направленности дипольных источников звука.

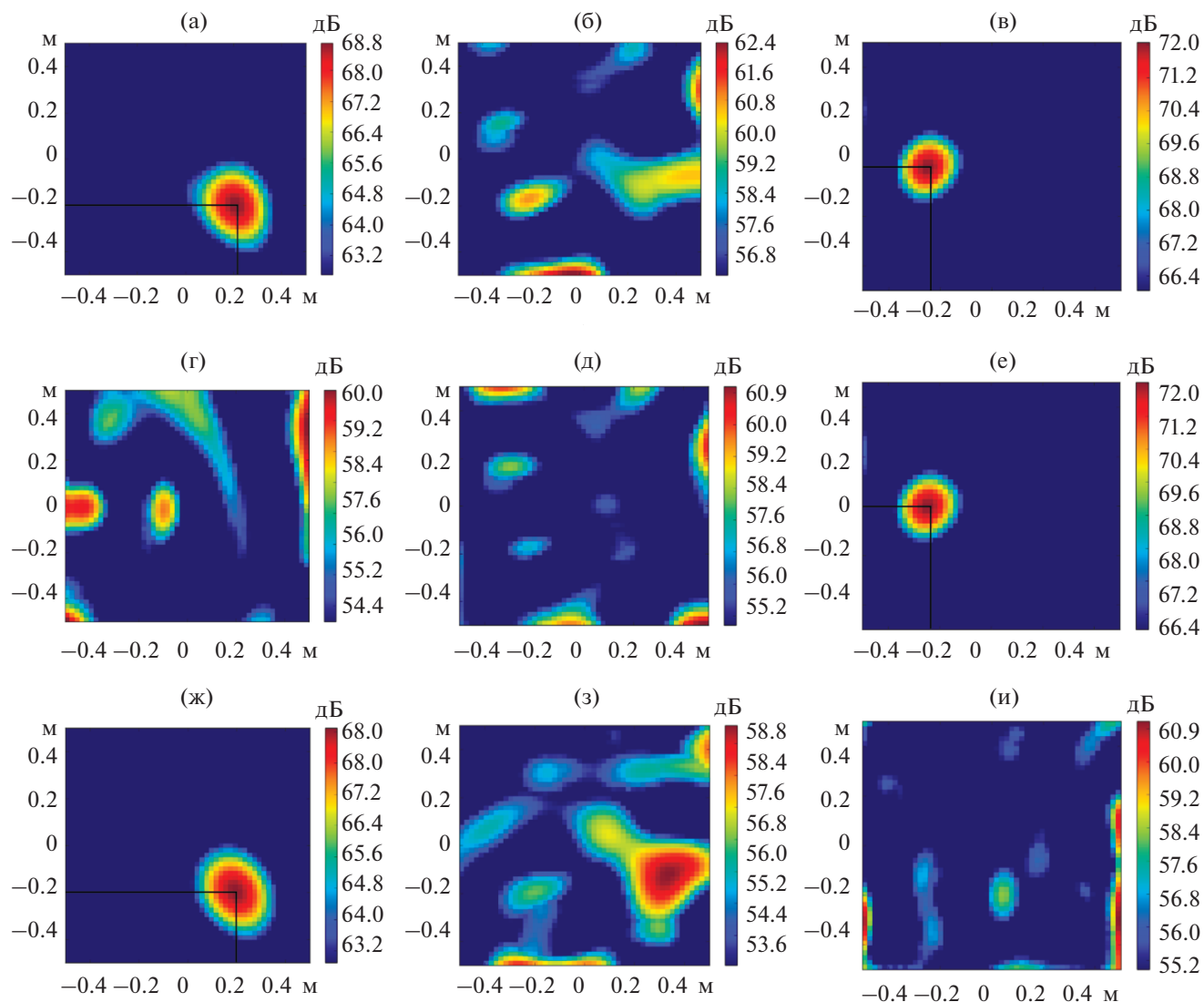


Рис. 3. Карты локализации акустических источников: (а)–(в) – одновременное моделирование монополя и x -диполя; (г)–(е) – моделирование монополя; (ж)–(и) – моделирование x -диполя; (а), (г), (ж) – вывод интенсивности x -диполя; (б), (д), (з) – вывод интенсивности y -диполя; (в), (е), (и) – вывод интенсивности монополя.

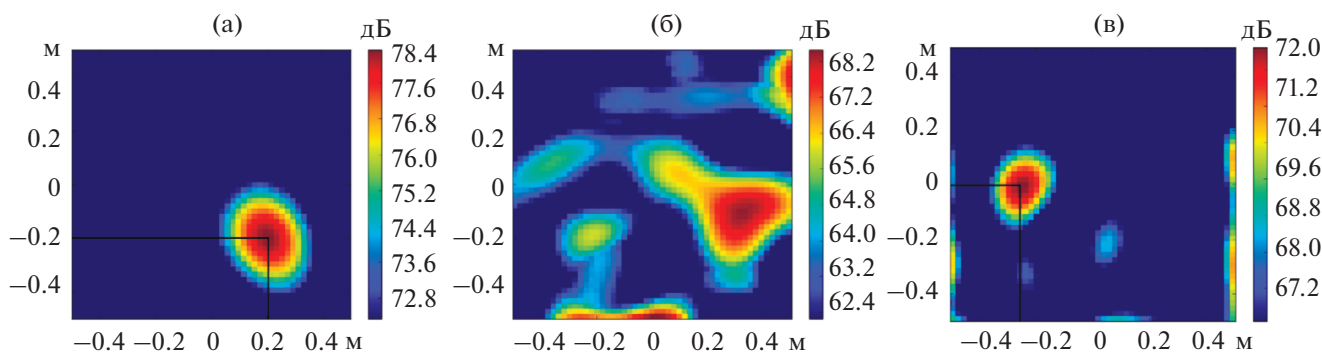


Рис. 4. Карты локализации акустических источников (амплитуда x -диполя в 3 раза больше амплитуды монополя): (а) – вывод интенсивности x -диполя; (б) – вывод интенсивности y -диполя; (в) – вывод интенсивности монополя.

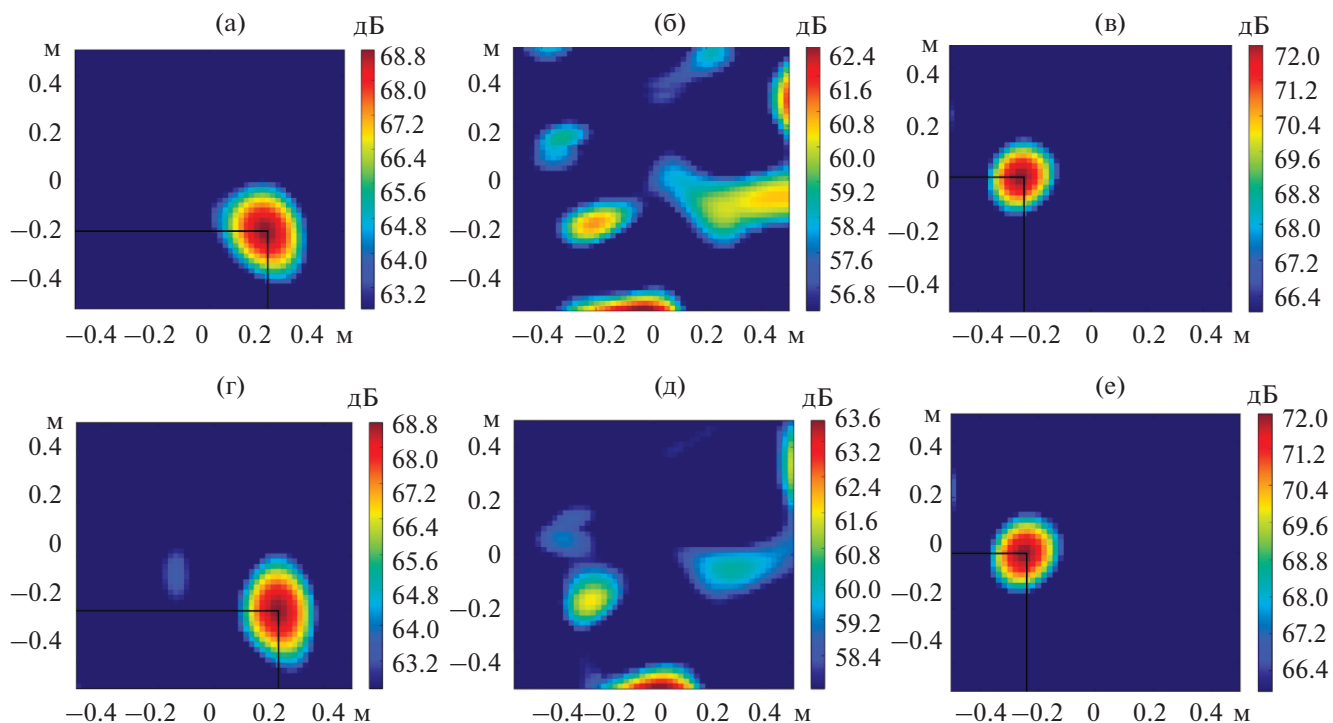


Рис. 5. Влияние неточности задания волнового числа. Одновременно моделировались монополь и x -диполь: (а)–(в) – волновое число задано корректно; (г)–(е) – волновое число задано с ошибкой, путем изменения скорости звука с 330 на 340 м/с.

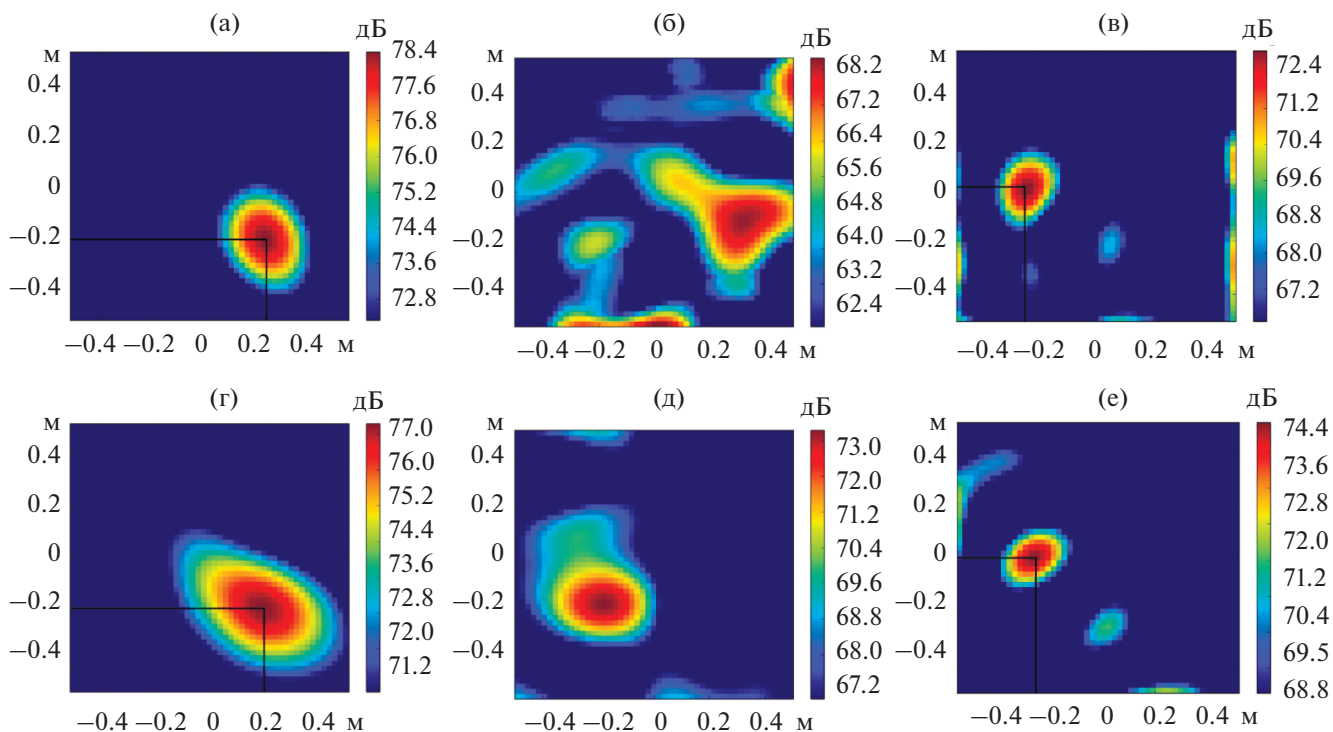


Рис. 6. Влияние неточности задания положения плоскости источников. Одновременно моделировались монополь и x -диполь с увеличенной в 3 раза амплитудой: (а)–(в) – положение сетки источников соответствует действительному положению источников; (г)–(е) – сетка источников сдвинута на 2 см от действительного положения источников в направлении от микрофонной решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод идентификации источников звука, основанный на корреляционном анализе акустических полей. В предположении некоррелированности звуковых источников, данный подход позволяет свести обратную задачу нахождения поля источников по данным многомикронных измерений к корректно поставленной задаче без привлечения дополнительных предположений о структуре источников. Отметим, что такой подход годится только в случае некоррелированных точечных источников. Результаты имеют общий характер, поэтому соответствие их авиационным приложениям и диапазон параметров, при которых такое предположение возможно, будет исследован в дальнейшем.

Разработанный метод численно верифицирован на примере определения полей источников, составленных одновременно из монополюсной и дипольных компонент. В результате численных тестов показано, что метод позволяет с помощью плоской микрофонной решетки одновременно корректно определять амплитуды монополюс и двух компонент диполей, с дипольными моментами, направленными параллельно плоскости микрофонной решетки. Исследована устойчивость метода по отношению к неточностям задания волнового числа и положению плоскости источников.

Дальнейшие исследования будут направлены на адаптацию разработанного метода применительно к шуму турбулентной струи и определению пространственного распределения интенсивности квадрупольных источников в соответствии с аналогией Лайтхилла [15].

Автор благодарит В.Ф. Копьева и Г.А. Фараносова за проявленный интерес к данной работе и плодотворные советы по представлению результатов при написании текста статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 21-71-30016).

Работа направлена на дальнейшее развитие УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФГУП “ЦАГИ”, модернизируемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 75-11-2021-066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Billingsley J., Kinns R.* The acoustic telescope // *J. Sound Vibr.* 1976. V. 48. P. 485–510.
2. *Michel U.* History of acoustic beamforming // 1st Berlin Beamforming Conference. 2006.
3. *Sijtsma P.* Beamforming on moving sources // NLR Technical Report. 2006. NLR-TP-2006-733.
4. *Sijtsma P.* Acoustic array corrections for coherence loss due to the wind tunnel shear layer // 2nd Berlin Beamforming Conference. 2008. BeBeC-2008-15.
5. *Dougherty R.P., Mendoza J.M.* Nacelle In-duct Beamforming using Modal Steering Vectors // AIAA paper 2008-2812, 2008.
6. *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.
7. *Бычков О.П., Демьянов М.А., Фараносов Г.А.* Локализация дипольных источников шума плоскими микрофонными решетками // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 5. С. 675–687.
8. *Rienstra S.W., Hirschberg A.* An Introduction to Acoustics // Eindhoven University of Technology, 2004
9. *Porteous R., Prime Z., Doolan C., Moreau D., Valeau V.* Three-dimensional beamforming of dipolar aeroacoustic sources // *J. Sound Vibr.* 2015. V. 355. P. 117–134.
10. *Козубская Т.К., Плаксин Г.М., Софронов И.Л.* Постановка и метод решения задачи бимформинга для локализации акустического источника на основе данных вычислительного эксперимента // *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.* 2021. Т. 61. № 11. С. 1904–1926.
11. *Бурмистров А.Н., Демьянов М.А.* Краткий курс теории матриц: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2017. 68 с. ISBN 978-5-7417-0628-2
12. *Демьянов М.А., Бычков О.П.* Обобщение стандартного алгоритма “бимформинг” для идентификации акустических источников с помощью несинхронных измерений микрофонной решеткой // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 2. С. 162–172.
13. *Гулл. Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
14. *Padois T., Robin O., Berry A.* 3D Source localization in a closed wind-tunnel using microphone arrays // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2013-2213, 2013.
15. *Lighthill M.J.* On sound generated aerodynamically: I. General theory // *Proc. Royal Soc. A.* 1952. V. 211. № 1107. P. 564–581.