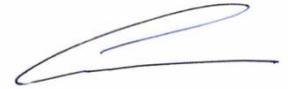


На правах рукописи



Ершов Виктор Валерьевич

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ ПЛОСКИХ
МИКРОФОННЫХ АНТЕНН ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ
ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА МОНОПОЛЬНОГО И ДИПОЛЬНОГО ТИПА**

Специальность 1.3.7 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы».

Научный руководитель: Копьев Виктор Феликсович, доктор физико-математических наук, профессор, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Москва)

Официальные оппоненты: Комкин Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (г. Москва)
Шанин Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва)

Ведущая организация: Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева (г. Москва)

Защита состоится «16» декабря 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.214.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.П. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/1875> Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.П. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Отзывы просим направлять по почте в двух экземплярах по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43, ТОИ ДВО РАН, приемная.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.214.01,
кандидат технических наук, с.н.с



А.Е. Костив

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание новейших отечественных пассажирских самолетов, удовлетворяющих сертификационным требованиям Международной организации гражданской авиации (ИКАО) по допустимому уровню шума невозможно без применения перспективных технологий в области шумоглушения, в связи чем разработка методов и средств для борьбы с авиационным шумом является особо актуальной задачей. Одним из главных источников шума пассажирского самолета на режиме посадки, сопоставимого с шумом двигателей, является аэродинамический шум обтекания планера, возникновение которого обусловлено пульсациями аэродинамических сил на крыле, вихрями при обтекании поверхностей планера, а также турбулентными следами за плохо обтекаемыми телами. Размерный анализ общего уравнения генерации звука потоком в присутствии твердых границ показывает, что аэродинамический шум генерируют источники дипольного типа, представляющие собой флюктуирующие силы при взаимодействии потока с обтекаемым телом.

Для разработки эффективных средств подавления шума необходимо иметь информацию о распределении акустических источников в пространстве и об интенсивности их излучения. Одним из наиболее универсальных способов получения данной информации является проведение акустических измерений с помощью многомикрофонных антенн, позволяющее на основе реализации пост-обработки регистрируемых сигналов с определенной степенью достоверности визуализировать источники шума в интересующих частотных полосах. В основе общепринятого алгоритма обработки лежит предположение о монополярности источников, которое можно обойти путем использования модифицированных методов, расширяющих область применения микрофонных решеток за счет адаптации к учету акустических диполей, что особенно актуально в задачах аэроакустики, связанных с обтеканием твердых тел турбулентными потоками.

Помимо этого, одним из важнейших параметров, определяющих качество последующей пространственной интерпретации проводимых измерений, является физическое расположение микрофонов в антенне, от позиции которых напрямую зависят значения её ключевых критериев – величины разрешающей способности и обеспечиваемого динамического диапазона. Путем постановки и решения задачи минимизации целевой функции, определяемой на основе диаграммы направленности антенны, можно добиться снижения боковых лепестков, наличие которых ведет к появлению ложных пиков в конечной карте локализации.

Степень разработанности темы. Существует ряд научных статей, посвященных локализации источников звука различных типов с помощью многомикрофонных антенн. Рассмотрено измерение линейной микрофонной антенной шума аэроакустического диполя, создаваемого цилиндром в поперечном потоке, с помощью модификации монополярного алгоритма путем фазовой коррекции для повышения его чувствительности к источникам дипольного типа (Jordan P., Fitzpatrick J., Valiere J.). Реализован метод локализации с коррекцией алгоритма на основе опорного диполя, который был протестирован в исследованиях в аэродинамической трубе по локализации диполей в различной пространственной ориентации (Liu Y., Quayle A., Dowling A., Sijtsma P.).

Специалистами ЦАГИ был разработан собственный дипольный алгоритм, протестированный в экспериментальных исследованиях в заглушенной камере АК-2 с применением метода азимутальной декомпозиции для оценки вклада отдельных азимутальных мод в общий уровень создаваемого шума при проведении эксперимента с обтеканием цилиндра и тонкой пластины воздушной струей (Бычков О.П., Демьянов М.А., Фараносов Г.А.). Существует дипольный алгоритм, в основе которого лежит применение псевдообратной матрицы (Suzuki T.), эффективность которого была протестирована в экспериментальных условиях (Zavala P., Roeck W., Janssens K., Arruda J., Sas P., Desmet W.).

Исходя из обзора научной литературы, можно заключить, что экспериментальная и теоретическая база в данной области довольно хорошо проработана. Однако ни в одной из этих работ не уделяется внимание настройке непосредственно самой антенны на оптимальное качество локализации диполей, пространственное распределение микрофонов в которой напрямую влияет на качество реконструкции звуковых источников. Существует большое количество работ (Christensen J.J., Hald J., Sijtsma P., Dougherty R.P., Malgoezar A.), связанных с поиском оптимального положения микрофонов в антенне, однако все они рассматриваются только в контексте локализации акустических монополей.

Целью работы является разработка и создание новейшего инструментария для проведения локализации звуковых источников монопольного и дипольного типа, включающего новые алгоритмы оптимальной настройки микрофонных антенн для измерений звуковых источников монопольного и дипольного типа.

Задачи работы:

1. Создание новой плоской микрофонной антенны, позволяющей изменять число микрофонов и их положение по радиальной и угловой координате, что необходимо для экспериментальной верификации расчетных методов оптимальной настройки антенн на эффективную локализацию источников звука монопольного и дипольного типа.

2. Развитие математической модели, позволяющей находить оптимальное положение на плоскости заданного числа микрофонов с заданной апертурой с целью повышения эффективности проведения измерений источников звука монопольного и дипольного типа.

3. Реализация алгоритмов обработки экспериментальных данных для построения карт локализации с целью обнаружения с максимальной эффективностью звуковых источников монопольного и дипольного типа. Верификация работоспособности созданных алгоритмов на модельных монопольных и дипольных звуковых источниках посредством проведения виртуальных экспериментов.

4. Проведение натуральных экспериментов по локализации источников звука дипольного типа, возникающих при взаимодействии дозвукового турбулентного потока с твердыми телами различной конфигурации, с применением разработанного инструментария.

5. Сравнительный анализ результатов экспериментов, полученных по используемым в мировой практике схемам настройки микрофонных антенн с результатами, полученными с применением разработанного инструментария.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая микрофонная антенна, позволяющая изменять положение микрофонов по угловой и радиальной координате в соответствии с расчетными значениями оптимальной настройки антенны на обеспечение максимального динамического диапазона локализации источников шума монопольного и дипольного типа.

2. Усовершенствована математическая модель, позволяющая более точно находить оптимальное положение на плоскости заданного числа микрофонов с заданной апертурой с целью повышения эффективности проведения измерений источников звука дипольного типа.

3. Проведены экспериментальные исследования шума взаимодействия турбулентных течений с препятствиями (струя – тонкий стержень, струя – тонкая пластина), которые впервые выполнялись с помощью микрофонной антенны, специальным образом настроенной для измерения именно дипольных источников звука. Получены карты локализации звуковых источников дипольного типа и определены их спектральные и акустические характеристики на основе результатов проведенных измерений. Установлено, что антенна, оптимизированная по усовершенствованной математической модели настройки на локализацию источников дипольного типа, дает прирост динамического диапазона до 2 дБ относительно известных моделей.

Практическая значимость. Разработанный измерительный комплекс позволяет провести уточнение решения для широкого спектра важнейших аэроакустических задач, связанных с взаимодействием турбулентного потока с элементами планера, например, при исследовании дипольно-ориентированного звукового поля при обтекании стоек шасси. Повышение точности применяемых средств измерений за счет описанных в работе методов может помочь в выборе оптимальных конструктивных схем компоновки элементов планера, что в конечном итоге будет способствовать модернизации существующих и разработке перспективных методов шумоглушения гражданских самолетов. Разработанный комплекс, обладающий вариативностью настройки к условиям проведения эксперимента, обеспечивает качество локализации, не уступающее существующим мировым аналогам, и может быть использован в рамках импортозамещения зарубежного оборудования и программных средств для визуализации источников шума микрофонными решетками. На разработанное программное обеспечение для пост-обработки получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ (№ 2018664971 от 27.11.2018).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод настройки антенны путем оптимизации расположения микрофонов с помощью вычисления функции рассеяния точки позволяет существенно снизить боковые лепестки на карте локализации акустических диполей по сравнению с существующими методами настройки антенн на основе монопольных звуковых источников.

2. Конструкция новой микрофонной антенны с возможностью изменения числа и положения микрофонов по угловой и радиальной координате позволяет

проводить научные исследования по верификации алгоритмов настройки расположения микрофонов в плоской антенне для эффективной локализации источников звука.

3. Виртуализация шума обтекания цилиндрического стержня турбулентным потоком на основе проведения вычислительного эксперимента по своим спектральным характеристикам демонстрирует высокую степень соответствия с реальным дипольно-индуцируемым звуковым полем, что позволяет провести первичную верификацию микрофонной антенны в процессе её адаптации к высокоэффективной локализации акустических диполей.

4. Применение настроенной новым способом микрофонной антенны в серии акустических испытаний в натуральных условиях демонстрирует прирост эффективности локализации диполей за счет снижения зашумленности финальных карт распределения звука. Дополнительный контроль интенсивности и положения локализуемого диполя путем определения модального состава звукового поля подтверждает хорошее соответствие данных параметров с теоретической моделью эволюции распределения интенсивности дипольного излучения вниз по потоку от среза сопла при заданной осевой координате диполя.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались многоканальные методы измерений звукового поля, основанные на применении многомикрофонных антенн, с последующей обработкой регистрируемых микрофонами звуковых сигналов методом «плоского бимформинга» исследования выполнены с использованием современного измерительного оборудования и программного обеспечения. Поиск оптимального набора координат микрофонов в антенне выполнялся с использованием методов решения задач условной оптимизации с помощью общеизвестного алгоритма («Minimax»).

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов пост-обработки акустических измерений устанавливалась путем сравнения с данными, полученными другими исследователями по аналогичным экспериментам. Верификация программного кода для построения диаграммы направленности проводилась с использованием математической модели, разработанной J. Christensen и J. Hald (Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S).

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на: 12-м студенческом региональном конкурсе научных проектов по программе «УМНИК» (г. Пермь, 2015), 3-й, 5-й и 6-й всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания» (г. Москва, 2018; 2020; 2021), 19-й и 20-й международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR) (г. Новосибирск, 2018; 2020; 2022), международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (г. Самара, 2020), 16-й, 18-й, 19-й и 20-й всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2015; 2017; 2018; 2019), 5-ой Всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения» (г. Пермь, 2018), 6-й и 7-й открытой всероссийской конференции по аэроакустике (г. Звенигород, 2019; г. Геленджик, 2021); 3-й международной конференции «Наука будущего» (г. Сочи, 2019).

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 13 публикациях; из них 7 опубликованы в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, и входящих в международные базы данных научного цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад соискателя. Диссертация написана по результатам исследований, выполнявшихся в ПНИПУ в период с 2017 по 2021 гг., где автор участвовал в качестве ответственного исполнителя, в том числе в рамках гранта РФФИ «Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре» (код: «Аспиранты») по теме: «Разработка новых алгоритмов эффективной локализации источников звука дипольного типа плоскими микрофонными антеннами», договор № 19-32-90071\19. Разработка, реализация и валидация представленных методов настройки микрофонных антенн, написание, отладка и оформление программного кода, пост-обработка результатов акустических измерений, а также постановка условий проведения экспериментальных исследований, были выполнены автором лично. Проектирование, разработка и сборка регулируемой конструкции микрофонной антенны, реализация численного моделирования, а также подготовка и настройка оборудования для проведения экспериментов в заглушенной камере, выполнялись при участии сотрудников Центра акустических исследований ПНИПУ. Доля автора диссертации в представленных исследованиях составляет от 30% до 90%. Доля автора диссертации в статьях в соавторстве составляет от 10% до 80%.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 123 наименований. Общий объем диссертации составляет 130 страниц, 56 рисунков и 11 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, приведены задачи диссертации, сформулирована научная новизна, дана характеристика практической значимости работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, описаны методы исследования, представлена краткая аннотация содержания глав диссертации.

В первой главе рассмотрены проблемы генерации шума летательных аппаратов. Описаны механизмы генерации аэродинамического шума обтекания планера, индуцируемого источниками дипольного типа, возникающих вследствие флуктуации сил при взаимодействии потока с обтекаемым телом. Представлена картина ранжирования источников шума, создаваемого современными магистральными самолетами на различных режимах полета, которая свидетельствует о сопоставимых уровнях аэродинамического шума обтекания планера с шумом двигательной установки на режиме посадки. Рассмотрено состояние вопроса о проведении исследований по локализации источников звука с помощью микрофонных антенн. Приведены математические основы процедуры пост-обработки акустических данных для визуализации источников шума с помощью общеизвестного алгоритма Conventional Beamforming.

Во второй главе проведена оценка качества локализации точечных источников шума с помощью общеизвестных методов пост-обработки для принятия решения о целесообразности их реализации в программном коде. Оценочный анализ карт локализации, полученных с использованием различных методов, показывает высокий уровень соответствия реализованного алгоритма Cross-Spectral Beamforming с алгоритмом, используемым в ПО Bruel & Kjaer (B&K) с закрытым исходным кодом, как по определяемому уровню звукового давления, так и по визуальному соотношению областей распределения источников. Отличительной особенностью метода является обнуление главной диагонали в матрице взаимных спектров, что ведет к существенному снижению боковых лепестков в карте локализации за счет когерентного суммирования взаимно-спектральных компонентов, не зависящих от собственного шума, что ведет к его подавлению в процессе усреднения.

Проведена разработка собственного приложения для визуализации акустических источников с поддержкой необходимых алгоритмов и настроек, недоступных в фирменном ПО B&K. Приложение было реализовано в интерактивном модуле математического пакета MathWorks MATLAB и имеет сопоставимый с фирменным ПО функционал и вычислительную скорость, что достигается за счет применения набора функций и объектов, позволяющих решать широкий спектр задач цифровой обработки сигналов в матричной форме в многопоточном режиме. Проведение процедуры верификации разработанного приложения на основе сравнительного анализа результатов пост-обработки с ПО B&K на примере визуализации шума свободно летящего вихревого кольца в акустической заглушенной камере представлено на рисунке 1.

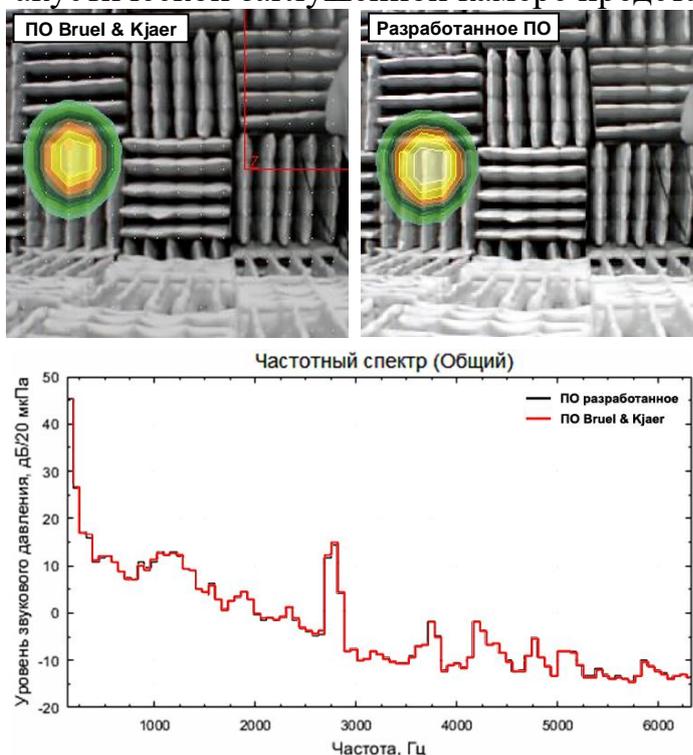
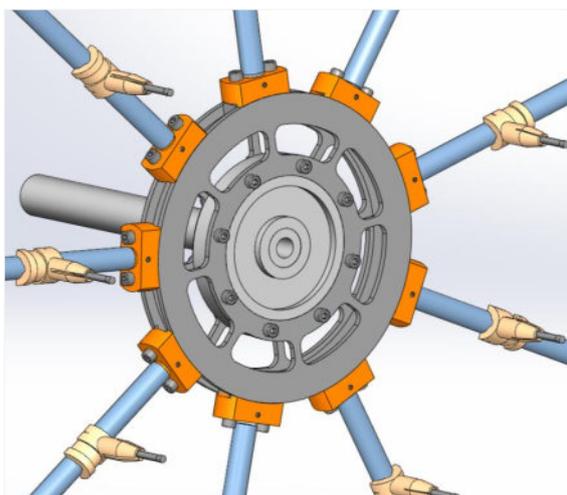


Рисунок 1 – Проведение верификации разработанного приложения

Для разработки аппаратного комплекса с поддержкой внесения конструктивных изменений, было выполнено проектирование и создание регулируемой конструкции лучевой микрофонной антенны, обладающей возможностью выбора числа лучей и числа микрофонов на лучах, а также проведения точного позиционирования микрофонов по угловой (с шагом 1°) и радиальной (с шагом 1 мм) координате, что обеспечивается нанесением разметки. Разработанная конструкция, соответствующая ей компьютерная модель и основные конструктивные элементы антенны представлены на рисунке 2.



(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2 – Разработанная конструкция микрофонной антенны:

(а) – компьютерная модель; (б) – изготовленная конструкция: 1 – центральное тело; 2 – диск с угловой разметкой; 3 – сухарь; 4 – луч; 5 – державка; 6 – хомут; 7 – веб-камера; (в) – сухарь на центральном диске; (г) – державка с микрофоном

Центральное тело представляет собой диск с втулкой для установки веб-камеры. Для обеспечения необходимой твердости при изготовлении распределенных по внешней окружности зубьев, диски были изготовлены из стали. Для изготовления центрального тела из дюралюминия, вся центральная часть конструкции антенны была сделана составной. Лучи антенны вставляются в сухари и поджимаются в основании винтами. Для точного позиционирования микрофонов на каждый луч наклеена линейная шкала. На лучи устанавливаются державки из ABS-пластика, в которые вставляются микрофоны, и фиксируются на лучи хомутами. Антенна крепится к раздвижной стойке через длинную втулку центрального тела. Конструкция изготовлена из металлических и полимерных материалов, благодаря чему обеспечивается оптимальная масса сборки при установке на стойку (до 10 кг) в совокупности с необходимой жесткостью. Данные особенности выгодно отличают разработанную антенну от аналогичных продуктов мировых производителей, позволяя использовать ее в научных исследованиях по верификации новых алгоритмов настройки плоских антенн с целью повышения качества локализации путем тестирования оптимального набора расположения микрофонов в экспериментальных условиях.

В третьей главе была проведена реализация математической модели для проведения настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации монополей, которая основана на вычислении целевой функции,

описывающей диаграмму направленности в заданном пространстве проекций волновых векторов и зависящей только от одного вектора, содержащего координаты всех микрофонов в антенне. Путем выполнения всего лишь одного расчета, становится возможным получить сразу всю карту размещения боковых лепестков в интересующем диапазоне частот, которая будет соответствовать конкретной антенне с конкретным расположением микрофонов. Применяя различные методы оптимизации и начальные условия выполнения расчета, можно получить конфигурацию антенны, обладающую высокой эффективностью локализации для выполнения конкретной экспериментальной задачи.

Математически метод настройки антенны выражается исходя из основных уравнений Conventional Beamforming, но при удалении антенны на бесконечное расстояние от источника. Определяется вектор, содержащий звуковые давления в частотной области, и формируется модельный вектор звуковых давлений, содержащий в себе неизвестную амплитуду $P_0(\omega)$, подлежащую дальнейшей оценке путем минимизации разности между модельным и экспериментальным вектором, что легко можно выполнить методом наименьших квадратов:

$$J = \|\mathbf{P}_{meas} - P_0(\omega)\mathbf{g}\|^2,$$

где \mathbf{P}_{meas} – вектор, содержащий набор регистрируемых микрофонами амплитуд звукового давления; \mathbf{g} – направляющий вектор, связывающий координаты точек сетки и позиции микрофонов ($n = 1 \dots N$) на представляющих интерес частотах, содержащий в себе передаточные функции $g_n(\omega) = e^{-i\omega\Delta t_n} / r_n$, где Δt_n – временная задержка сигнала, r_n – вектор, определяющий расстояние между микрофоном и точкой сетки. В результате решения можно записать:

$$\hat{P}_0(\omega) = \mathbf{g}^* \mathbf{P}_{meas} / \mathbf{g}^* \mathbf{g}.$$

Путем оценки амплитуд потенциальных источников в каждой точке сетки, формируется конечная карта локализации. Для определения целевой функции, формирующей диаграмму направленности, вводится допущение, что антенна располагается в дальнем поле для представления звуковых сигналов в качестве плоских волн, вследствие чего интерес представляет только направление их падения. Рассматривая источник с единичной амплитудой и волновым вектором \vec{k}_0 , давление, регистрируемое микрофонами в антенне, равно:

$$\mathbf{P}_{meas} = \left[e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_1} \quad \dots \quad e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_N} \right]^T.$$

где \vec{k} – волновой вектор. Направляющий вектор, определяющий связь между антенной и точкой сетки в направлении волнового вектора \vec{k}_1 , равен:

$$\mathbf{g} = \left[e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} \quad \dots \quad e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_N} \right]^T,$$

где \vec{k}_0 и \vec{k}_1 соответствуют одной и той же частоте. В итоге можно записать:

$$\mathbf{g}^* \mathbf{P}_{meas} = \left(e^{-i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_1} + \dots + e^{-i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_N} e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_N} \right), \quad \mathbf{g}^* \mathbf{g} = \left(e^{-i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} + \dots + e^{-i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_N} e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_N} \right) = N,$$

$$\hat{P}_0(\omega) = \mathbf{g}^* \mathbf{P}_{meas} / \mathbf{g}^* \mathbf{g} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{-i(\vec{k}_1 - \vec{k}_0) \cdot \vec{r}_n} = W(\vec{k}_1 - \vec{k}_0) = W(\vec{K}),$$

где $W(\vec{K})$ – апертурная сглаживающая функция, содержащая в себе все представляющие интерес направления для сканирования падающих на антенну

плоских волн. Далее формируется радиальный профиль диаграммы направленности для вывода функции максимального уровня боковых лепестков:

$$MSL(K) = \max_{K_{\min} \leq K' \leq K_{\max}} W_p(K') \equiv 10 \cdot \log_{10} \left[\max_{K_{\min}^0 \leq |\bar{K}| \leq K_{\max}} |W(\bar{K})|^2 / N^2 \right],$$

где $K_{\min}^0 = 2.44\pi/D$ – первый минимум функции диаграммы направленности, соответствующий круговой апертуре с диаметром D . Путем минимизации данной функции можно добиться низких уровней боковых лепестков, напрямую влияющих на качество локализации. Применение апертурной сглаживающей функции с последующей ее трансформацией в диаграмму направленности позволяет выполнять построение контурного графика частотно-зависимого размещения боковых лепестков для решеток с различной формой и апертурой. Для монопольной модели данная функция инвариантна к сдвигу, что делает ее важнейшим инструментом в реализации вычислительных моделей, позволяющих отслеживать влияние позиций микрофонов в решетке на диаграмму направленности в требуемой полосе частот фактически в реальном времени.

Была проведена настройка микрофонной антенны на оптимальное качество локализации монополей. При проектировании настраиваемой антенны в качестве аналога была выбрана имеющаяся в ЦАИ ПНИПУ 54-канальная микрофонная антенна фирмы В&К (Дания), конструкция которой состоит из 9 лучей равной длины, закрепленных на центральном теле, расположенных по окружности с равномерным угловым шагом (40°) и формирующих виртуальную описанную окружность диаметром 2.5 метра; на каждом луче располагается 6 точек для установки микрофонов, координаты которых идентичны на каждом луче. Данный выбор был сделан с целью проведения последующего сравнительного анализа с результатами, полученными с применением разработанного инструментария. Для проведения дополнительного анализа чувствительности разрешения в зависимости от изменения параметров апертуры, максимальный диаметр настраиваемой антенны был увеличен до 3 м (против 2.5 м в антенне В&К).

В результате работы программного кода определялось максимальное значение динамического диапазона. В качестве граничной частоты оптимизации было установлено значение 1500 Гц, определенное на основе анализа диаграммы направленности антенны В&К, на которой явно прослеживается резкий ступенчатый рост целевой функции, что было сделано исходя из анализа характерных особенностей метода оптимизации «Minimax», который, как правило, стремится нормализовать проектные параметры к единой гладкой линии с минимальным числом резких импульсных скачков. В качестве граничной частоты были использованы все частоты, на которых также проявляются характерные ступенчатые всплески целевой функции, однако оптимальные значения динамического диапазона были получены именно на частоте 1500 Гц. Для получения наиболее достоверных карт локализации важно обеспечить максимально достижимый динамический диапазон во всей полосе частот (до 8000 Гц), вследствие чего возникает необходимость применения ручной регулировки расчетных значений диапазона в области, выходящей за пределы оптимизации. Полученное в результате решения оптимизационной задачи

распределение микрофонов, а также сравнение функций максимальных уровней бокового лепестка обеих антенн, показаны на рисунке 3. Установлено, что диапазон оптимизированной схемы установки микрофонов в полосе до 8000 Гц составляет 8.1 дБ (для сравнения: у антенны В&К в соответствующей полосе динамический диапазон составляет 7.4 дБ при меньшем диаметре 2.5 м).

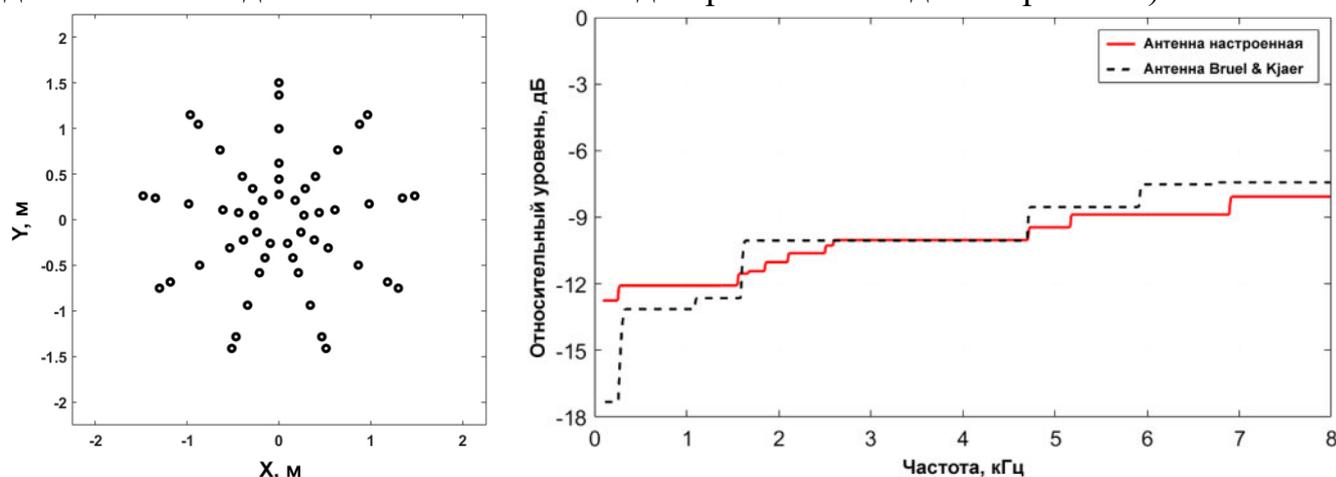


Рисунок 3 – Оптимизированная схема установки микрофонов в антенну (слева) и сравнение функций максимального уровня боковых лепестков (справа)

Определялось качество локализации виртуальных некоррелированных точечных монополей с помощью обеих антенн путем проведения виртуального эксперимента, который показал, что антенна, настроенная с учетом монополюсной оптимальной схемы установки микрофонов, обладает эквивалентным с коммерческой антенной качеством локализации. Увеличение диаметра антенны с 2.5 до 3 м влечет за собой рост апертуры, сужающей ширину главного лепестка, что благоприятно влияет на величину её разрешающей способности и дает преимущество при измерениях близкорасположенных источников.

Экспериментальные исследования по локализации шума проводились в аттестованной акустической заглушенной камере ЦАИ ПНИПУ с помощью обеих антенн, в качестве источников использовались пьезоэлектрические излучатели. Частоты излучения были определены с высокой точностью, центр пятен локализации совпадает с их реальным положением. Также были проведены исследования по локализации источников шума воздушной струи с установкой сопловых насадок конической и шевронной формы диаметром 40 мм для создания различных начальных условий истечения. Общий вид подготовленных антенн представлен на рисунке 4. Карты визуализации показаны на рисунке 5.

По результатам сравнительного анализа можно заключить, что разработанная антенна с оптимальной монополюсной настройкой, в комбинации с разработанным ПО, дают результаты лучшие, чем коммерческая антенна В&К, что выражается в более компактной области локализации источников на карте. На высоких частотах (рисунок 5), в тех случаях, когда уровень паразитного шума сопоставим с уровнем излучения основного источника, настроенная антенна дает менее зашумленную карту локализации. Небольшие отличия в определяемых уровнях обусловлены погрешностью позиционирования микрофонов.



Рисунок 4 – Общий вид подготовленных для измерений микрофонных антенн

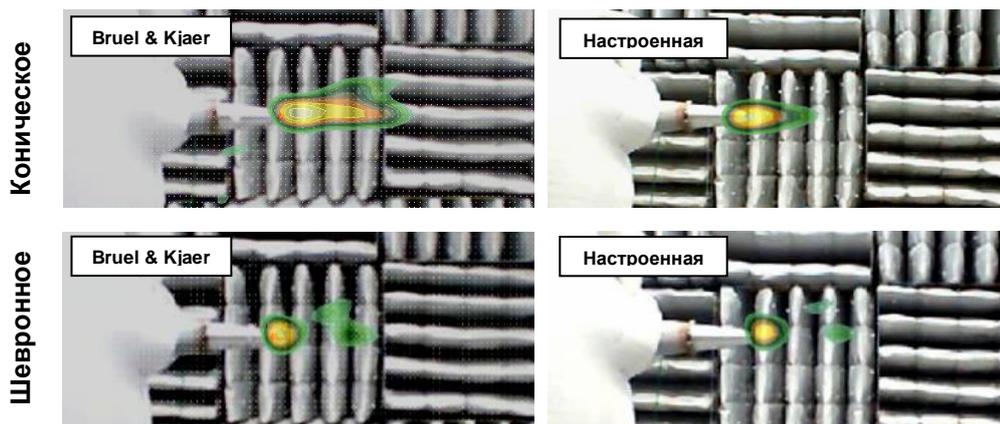


Рисунок 5 – Результаты локализации шума струи, истекающей из конического и шевронного сопел при скорости потока 0.55М, полученные антенной Bruel & Kjaer (слева) и разработанной антенной и ПО (справа). Частота 8000 Гц

В четвертой главе выполнена реализация алгоритма локализации диполей на основе коррекции монопольного алгоритма, которая выполняется путем модификации направляющего вектора с учетом дипольного момента. Подтверждено, что монопольный алгоритм некорректно определяет как положение, так и уровень звукового давления диполя: доминирующие источники идентифицируются в качестве двух монополей с эквивалентной амплитудой, равноудаленных относительно точки генерации диполя, что может привести к возникновению критических ошибок в задачах аэроакустики. Путем применения модифицированного алгоритма становится возможным реконструировать как положение, так и уровень исходного диполя. Для верификации реализованного алгоритма было проведено численное моделирование шума обтекания цилиндра в газодинамическом пакете ANSYS Fluent. Условия проведения эксперимента и экспериментально полученный спектр были взяты из работы, выполненной зарубежными исследователями (J. Boudet et al. AIAA 2003-3217). Для расчета поля потока выполнялось моделирование отсоединенных вихрей, шум в дальнем поле рассчитывался с помощью акустической аналогии Фокс Вильямса – Хоукинга. Вычислительный эксперимент был выполнен для двух взаимно перпендикулярных ориентаций цилиндра. В качестве точек для снятия звукового давления был использован набор позиций 54-х микрофонов антенны В&К. Варианты расположения цилиндра относительно антенны показаны на рисунке 6.

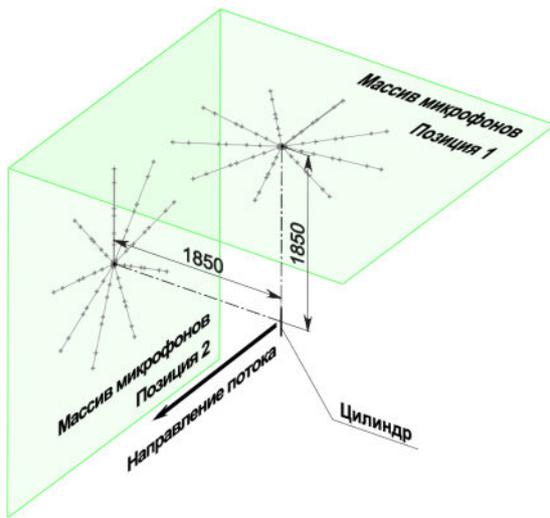


Рисунок 6 – Положение виртуальных антенн относительно цилиндра

Если в первом случае рассматривалась классическая генерация у-диполя, то второй случай был выполнен для проверки корректности определения уровня звукового давления диполя: в данной пространственной ориентации область скачка фазы сигнала направлена прямо на антенну, и локализуемый монополюсным алгоритмом уровень в пике излучения сопоставим с уровнем исходного диполя. Таким образом, с помощью традиционного монополюсного метода возможно провести отладку создаваемого дипольного алгоритма.

На рисунке 7 показана расчетная область, которая представляет собой прямоугольник, построенный вокруг цилиндра с размерами: $3d$ в ширину; $6d$ перед цилиндром; $14d$ после цилиндра; $5d$ над и под цилиндром. Число точек сетки 2.4×10^5 . Расстояние до первой точки сетки составляет 2×10^{-5} м, согласно $u+$ около 0.8. Длина сетки по размаху равна $3D$, что аналогично другим работам. Визуализация мгновенного потока хорошо соответствует реальной картине отрывного течения при обтекании цилиндра при высоких числах Рейнольдса.

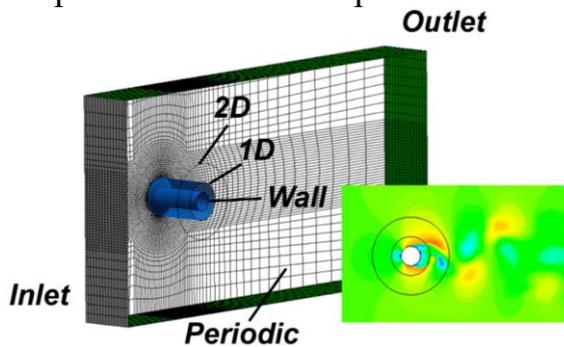


Рисунок 7 – Сетка с граничными условиями и мгновенный поток

Граничные условия: на входе (Inlet) – массовый расход 0.319 кг/с, что соответствует скорости набегающего потока 72 м/с, температура 290 К; на выходе (Outlet) и верхней и нижней границах – открытая граница с нулевым избыточным давлением и температурой 290 К. На боковых поверхностях ставились условия периодичности (Periodic). Использовался DDES-подход для моделирования турбулентности.

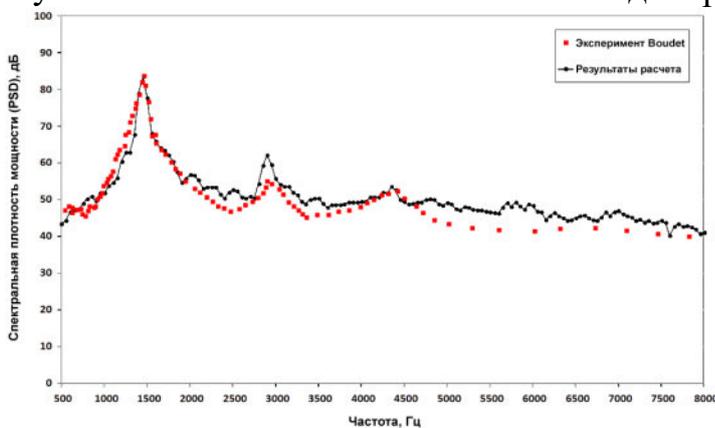


Рисунок 8 – Сравнение спектральной плотности мощности, полученной в численном моделировании, с экспериментальными данными J. Boudet

Далее была определена спектральная плотность мощности. Сравнение спектров шума показано на рисунке 8. Результаты расчета хорошо предсказывают уровень пика в спектре (частота 1450 Гц), что так же хорошо соотносится с частотой в экспериментальном спектре (около 1500 Гц). Число Струхалия составляет $Sh \approx 0.2$, что хорошо соответствует результатам для такого типа течений. Карты локализации шума обтекания цилиндра показаны на рисунке 9.

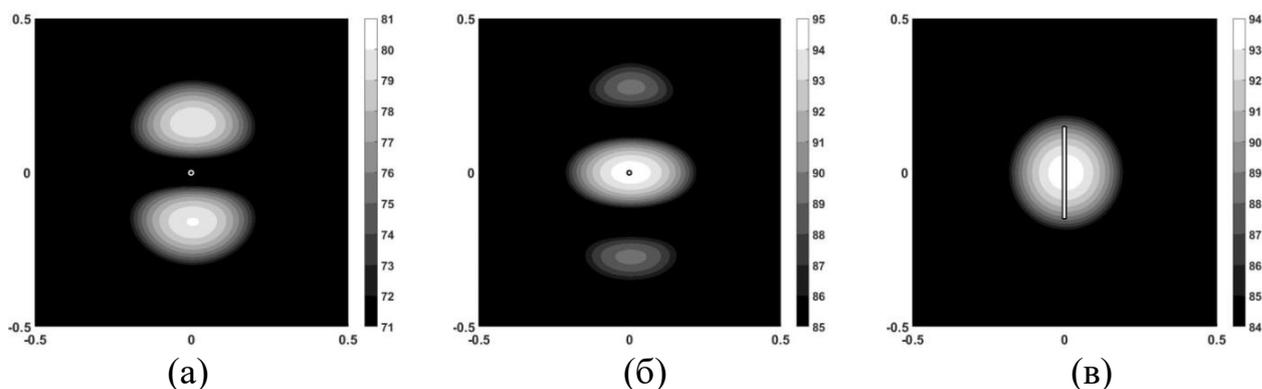


Рисунок 9 – Локализация источников шума обтекания цилиндра с помощью виртуальной антенны на частоте 1450 Гц: (а) – монопольный алгоритм, антенна в позиции 1; (б) – дипольный алгоритм, антенна в позиции 1; (в) – монопольный алгоритм, антенна в позиции 2. Ориентация цилиндра показана в центре карты

На рисунке 9 (а) представлен монопольный Conventional Beamforming алгоритм, на рисунке 9 (б) дипольный алгоритм, и на рисунке 9 (в) снова монопольный алгоритм для представления уровня звукового давления в области скачка фазы, направленной на антенну, в сравнении с уровнем звукового давления локализуемого диполя на рисунке 9 (б). Данные уровни отличаются не более чем на 1 дБ, что свидетельствует о корректной работе дипольного алгоритма.

Также было проведено дополнительное сравнение уровня звукового давления поперечного диполя на частоте 1450 Гц, полученного из спектра антисимметричной относительно оси струи моды a_1 . Данный спектр определялся с помощью измерений звукового давления двумя виртуальными микрофонами в точках, равноудаленных симметрично относительно оси потока. Сигналы, соответствующие продольному (мода a_0) и поперечному (мода a_1) диполям, можно вычислить по формулам:

$$a_0(x,t) \approx (p_1(x,t) + p_2(x,t))/2,$$

$$a_1(x,t) \approx (p_1(x,t) - p_2(x,t))/2.$$

Сравнение уровня звукового, полученного из данного спектра, с уровнем пика на карте локализации диполя, полученного с помощью реализованного алгоритма (рисунок 8 (б)), показало сопоставимые результаты, отличающиеся не более чем на 1 дБ. Численное моделирование шума обтекания цилиндра для генерации модельного диполя показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными, полученными другими исследователями, и может быть использовано для валидации и отладки реализованного дипольного алгоритма. Пик частотного спектра компоненты поперечного диполя был найден с помощью симуляции азимутального разложения звукового поля, опирающегося на основные принципы и уравнения метода азимутальной декомпозиции. Данный пик определяется на частоте вихреобразования, а его значение с минимальными расхождениями соответствует уровню звукового давления модельного диполя.

Было проведено развитие математической модели настройки антенны на оптимальное качество локализации диполей. Основной идеей для реализации являлась корректировка существующей монопольной модели, однако в случае излучения диполя необходимо учитывать угол падения плоской волны

относительно плоскости установки антенны вследствие косинусоидальной зависимости величины амплитуды от угла падения плоской волны относительно наблюдателя (направленности). С учетом данного факта, отклик антенны равен:

$$\hat{P}_0(\omega) = \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{P}_{meas}}{\mathbf{g}^* \mathbf{g}} = \frac{\cos \theta_0 \cos \theta_1}{\cos^2 \theta_1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{-i(\hat{k}_1 - \bar{k}_0) \bar{r}_n} = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{-i(\hat{k}_1 - \bar{k}_0) \bar{r}_n}$$

Для наглядности были построены две диаграммы направленности, соответствующие расположению микрофонов в антенне В&К. На рисунке 10 (а) показана диаграмма, соответствующая падению на антенну плоских волн от монополя, на рисунке 10 (б) – от диполя с учетом значения амплитуды в зависимости от точки наблюдения (направленности). Как можно заметить, результаты отклика антенны на падение звуковой волны от дипольного источника больше не инвариантны к сдвигу по отношению к проекциям волновых векторов.

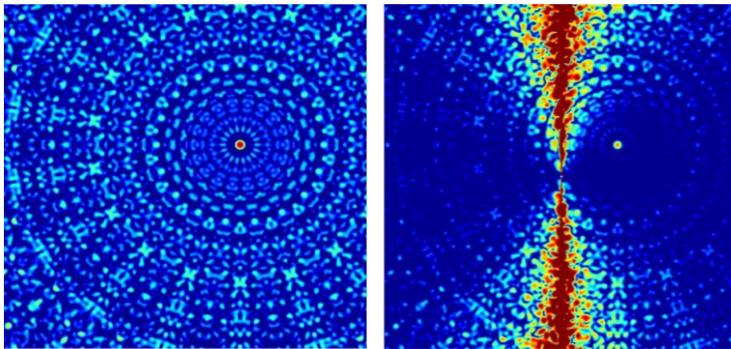


Рисунок 10 – Визуализация диаграммы направленности для антенны В&К, построенной на основе: монополя (слева) и диполя (справа)

При сканировании направлений падения звуковых волн, близких к перпендикулярным относительно плоскости антенны, косинус угла θ_1 , определяющий длину проекции \hat{k}_1 , устремляет апертурную функцию в бесконечность. Сформировать целевую функцию, зависящую только от вектора координат микрофонов, в частотной области проекций только одного вектора, не представляется возможным.

Для усовершенствования математической модели было решено использовать прямой расчет локализации диполя, находящегося на известном конечном расстоянии от плоскости размещения антенны. Данное решение было принято исходя из следующих соображений: при рассмотрении радиального профиля максимального уровня боковых лепестков на различных частотах было выявлено, что с ростом частоты происходит сжатие профиля по оси абсцисс в сторону главного лепестка, однако форма профиля остается практически неизменной. В то же время, обнаружен эффект колебания лепестков по амплитуде, что в дальнейшем необходимо исследовать более тщательно для минимизации погрешностей. Таким образом, было принято решение оценивать радиальный профиль только на верхней граничной частоте оптимизации.

Для обеспечения высокой вычислительной скорости была использована функция рассеяния точки (Point Spread Function, или PSF), которая описывает отклик микрофонной антенны на единичный точечный источник. Матрицу взаимных спектров, сформированную на основе излучения точечного источника с единичной амплитудой, можно записать как $\mathbf{C}_j = \mathbf{g}_j \mathbf{g}_j^*$. Следовательно:

$$A_{jk} = \mathbf{w}_k^* \bar{\mathbf{C}}_j \mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k^* \left[\mathbf{g}_j \mathbf{g}_j^* \right] \mathbf{w}_k,$$

где j, k – индексы точек дискретной сетки. По определению $A_{jk} = 1$ при $j = k$, а в идеальном случае амплитуда должна выражаться как $A_{jk} = 0$ при $j \neq k$. Однако при

использовании конечного числа микрофонов выполнение данного условия становится невозможным. Поэтому микрофонная антенна должна быть спроектирована таким образом, чтобы A_{jk} при $j \neq k$ было минимальным в необходимом диапазоне частот. В конечном итоге, для применения PSF с поправкой на дипольный источник, необходимо заменить направляющие векторы на соответствующие продольному или поперечному акустическому диполю:

$$A_{jk}^x = \frac{\mathbf{g}_k^{x*} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j^x \mathbf{g}_j^{x*} \end{bmatrix} \mathbf{g}_k^x}{\sum_{(m,n) \in S, m \neq n} |g_{mk}^x|^2 |g_{nk}^x|^2} = \mathbf{w}_k^{x*} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j^x \mathbf{g}_j^{x*} \end{bmatrix} \mathbf{w}_k^x, \quad A_{jk}^y = \frac{\mathbf{g}_k^{y*} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j^y \mathbf{g}_j^{y*} \end{bmatrix} \mathbf{g}_k^y}{\sum_{(m,n) \in S, m \neq n} |g_{mk}^y|^2 |g_{nk}^y|^2} = \mathbf{w}_k^{y*} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j^y \mathbf{g}_j^{y*} \end{bmatrix} \mathbf{w}_k^y,$$

где:

$$g_{nj}^x(\omega, \vec{\mathbf{r}}_n, \vec{\mathbf{r}}_j) = \frac{e^{-ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|}}{2k\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|^2} \left(-1 + ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\| \right) \cos \phi = \frac{e^{-ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|}}{2k\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|^3} (x_n - x_j) \left(-1 + ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\| \right),$$

$$g_{nj}^y(\omega, \vec{\mathbf{r}}_n, \vec{\mathbf{r}}_j) = \frac{e^{-ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|}}{2k\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|^2} \left(-1 + ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\| \right) \cos \theta = \frac{e^{-ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|}}{2k\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\|^3} (y_n - y_j) \left(-1 + ik\|\vec{\mathbf{r}}_n - \vec{\mathbf{r}}_j\| \right).$$

Таким образом, в работе предлагается проводить оценку параметров настраиваемой микрофонной антенны на основе построения функции максимального уровня бокового лепестка, полученной напрямую с карты локализации точечного дипольного источника, сформированного с помощью PSF на верхней частоте интересующего частотного диапазона, путем оценки радиального профиля боковых лепестков в исследуемой области пространства.

При проведении настройки антенны на оптимальное качество локализации диполей было решено использовать геометрическую конфигурацию, аналогичную антенне В&К, что было сделано, во-первых, для обеспечения сопоставимой величины разрешающей способности; во-вторых, для демонстрации достижения более эффективной локализации диполей путем проведения настройки антенны при соблюдении прочих равных условий – числа микрофонов, конструктивных особенностей лучевой антенны и соответствия её геометрических параметров.

Постановка задачи условной оптимизации выполнялась в пакете MathWorks MATLAB. На значения аргументов накладывались следующие ограничения: отклонение координаты наиболее удаленного от центра микрофона: ± 0.05 м для обеспечения вариативности координат при сохранении ширины полосы главного лепестка с минимальным разбросом; верхняя граничная частота оптимизации: 5000 Гц; расстояние между каждой парой соседних микрофонов: не менее 0.04 м для обеспечения достаточного пространства при установке державок; расстояние от плоскости положения антенны до виртуального источника: 2.5 м, соответствующее одному диаметру описанной окружности антенны, являющееся наиболее оптимальным при проведении акустических измерений микрофонной решеткой. Решение оптимизационной задачи проводилось с помощью метода «Minimax». Число начальных условий (наборов координат) составляло более 100 тыс. После вычисления каждой итерации, путем оценки функции максимального уровня бокового лепестка, определялся динамический диапазон

текущего набора. Сохранялись только результаты с диапазоном более 6 дБ. Для обеспечения сопоставимого с В&К разрешения контролировалась величина ширины полосы главного лепестка. На каждой итерации оценивался радиальный профиль карты локализации для выявления максимальных уровней боковых лепестков в заданной круговой области. После проведения вычислительных операций было найдено оптимальное распределение микрофонов в лучевой антенне, удовлетворяющее заданным параметрам. При сопоставимом значении разрешения, прирост динамического диапазона данной конфигурации составил около 2 дБ в диапазоне до 5000 Гц. Найденное распределение микрофонов и сравнение функций максимального уровня бокового лепестка с антенной В&К представлены на рисунке 11. В качестве дополнительной проверки, для контроля колебаний уровней боковых лепестков с ростом частоты, карты локализации были проанализированы во всей полосе частот с шагом 50 Гц. Установлено, что величина расхождений не превышает допустимых значений.

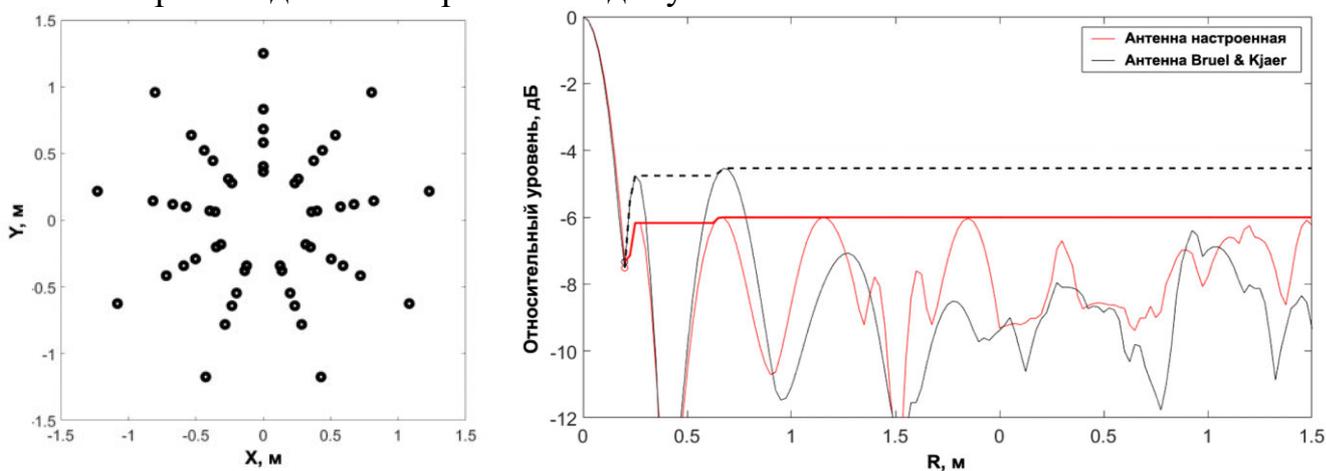


Рисунок 11 – Найденное распределение координат установки микрофонов для оптимальной локализации диполей (слева) и сравнение функций максимальных уровней бокового лепестка дипольно-настроенной микрофонной антенны с В&К (справа)

Проводилась первичная верификация результата настройки антенны с помощью аналитически заданных диполей. Теоретический прирост динамического диапазона настроенной антенны составляет около 2 дБ относительно В&К, как и ожидалось исходя из анализа функции уровня боковых лепестков, представленной на рисунке 11.

Были проведены экспериментальные исследования локализации диполей с помощью микрофонных антенн в акустической заглушенной камере ЦАИ ПНИПУ. Для проведения последующего сравнительного анализа, в измерениях были задействованы обе микрофонных антенны. В качестве механизма для генерации диполей рассматривалось взаимодействие турбулентной струи с твердым телом, в частности – обтекание тонкого цилиндрического стержня, а также взаимодействие потока с тонкой пластиной. Обе антенны располагались на расстоянии 2.5 м параллельно оси струи. В продольном направлении антенна устанавливалась таким образом, чтобы положение предполагаемого источника находилось как можно ближе к центру карты локализации.

На первом этапе проводилась локализация источников шума обтекания цилиндра. Эксперимент был выполнен в двух пространственных ориентациях: в первом случае продольная ось цилиндра пересекала центр микрофонной антенны, во втором случае была параллельна плоскости антенны и плоскости среза сопла (аналогично схеме, показанной на рисунке 3). Для построения частотного спектра компонент продольного и поперечного диполей с целью определения частоты пика излучения было решено провести регистрацию звукового давления дополнительно еще в 6 точках (по 2 микрофона в 3 параллельных плоскостях) для применения азимутального разложения звукового поля, как было сделано ранее. Первая плоскость находилась в плоскости расположения цилиндра, вторая и третья плоскости были удалены от первой на 0.5 м и на 1 м соответственно.

Максимальный уровень спектральной плотности мощности для поперечного диполя составил 66 дБ на частоте около 3200 Гц. Дополнительно была смоделирована кривая распределения интенсивности модельного диполя в зависимости от изменения продольной координаты (параллельно оси струи) для проведения сравнительного анализа с экспериментально полученными точками для доминирующей моды a_1 . Уровень звукового давления, соответствующий кривой спектральной плотности мощности, а также положение диполя по оси, параллельной оси струи, подбирались путем наилучшего соответствия с экспериментально полученными точками. В результате был получен модельный диполь, излучающий с уровнем, эквивалентным 88 дБ. Результаты локализации источников шума обтекания цилиндра показаны на рисунке 12.

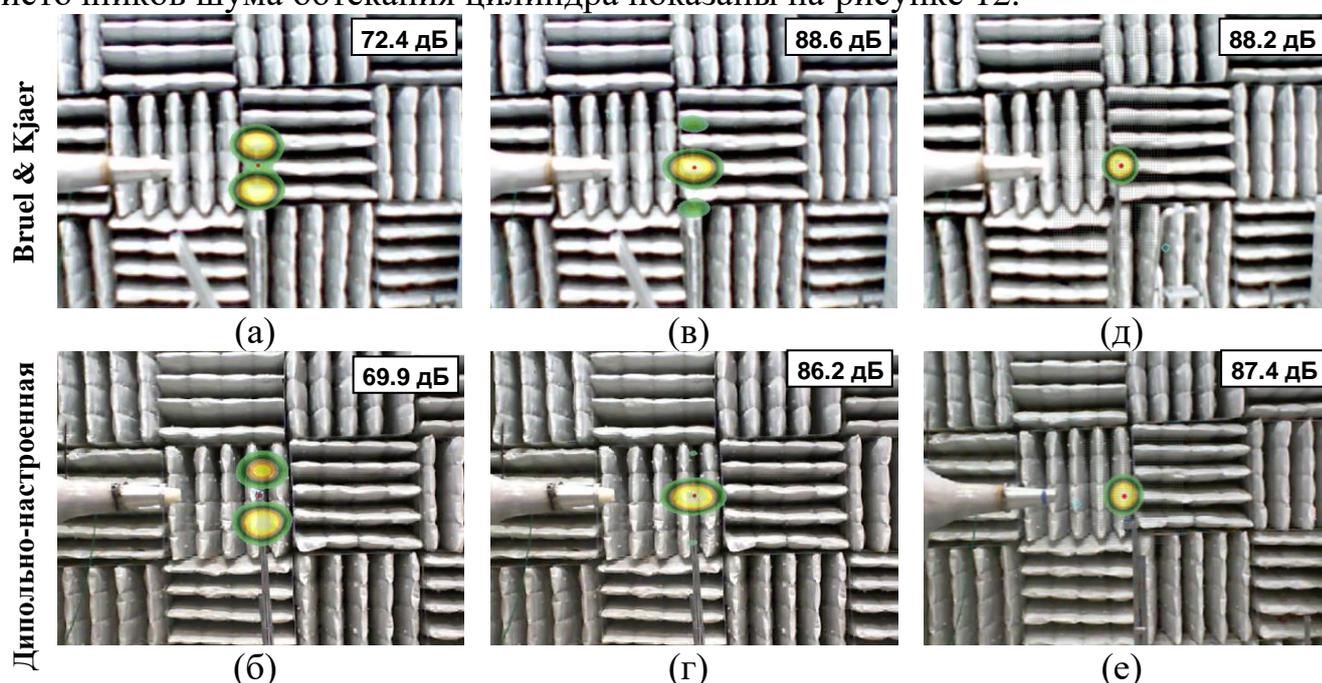


Рисунок 12 – Локализация шума обтекания цилиндра: (а), (б) – монополярный алгоритм, антенны в позиции 1; (в), (г) – дипольный алгоритм, антенны в позиции 1; (д), (е) – монополярный алгоритм, антенны в позиции 2

Можно заключить, что дипольно-настроенная антенна дает менее зашумленную карту. На рисунках 12 (а), (б) представлен традиционный монополярный алгоритм; пятна распределения источников практически идентичны

в обоих случаях. На рисунках 12 (в), (г) представлена обработка модифицированным дипольным алгоритмом. Настроенная антенна дает повышение динамического диапазона до 2 дБ по сравнению со своим фирменным аналогом при сопоставимом разрешении. На рисунках 12 (д), (е) представлена обработка монополярным алгоритмом в ориентации цилиндра, параллельного плоскости антенны (в области скачка фазы, направленной на антенну), для контроля уровней, получаемых после работы дипольного алгоритма. Среднее значение уровня звукового давления диполя составляет около 88 дБ, что соответствует значению, полученному с помощью азимутального разложения.

В качестве еще одного случая генерации звукового поля, близкого к полю излучения диполя, рассматривалось взаимодействие турбулентной струи (со скоростью 0.4 М) и задней кромки тонкой пластины, изготовленной из фанерного листа с размерами 450×900×6 мм. Данное взаимодействие объясняется дипольным характером доминирующего в боковом направлении звукового источника, связанного с рассеянием пульсаций ближнего поля струи на задней кромке пластины. Как и в предыдущем случае, для проведения сравнительного анализа уровня пика антисимметричной моды с уровнем модельного диполя, была выполнена установка 6 микрофонов по трем сечениям вдоль оси струи (по 2 в каждой плоскости). В результате был получен модельный диполь, излучающий с уровнем, эквивалентным 88.2 дБ. Результаты локализации шума взаимодействия потока и тонкой пластины представлены на рисунке 13.

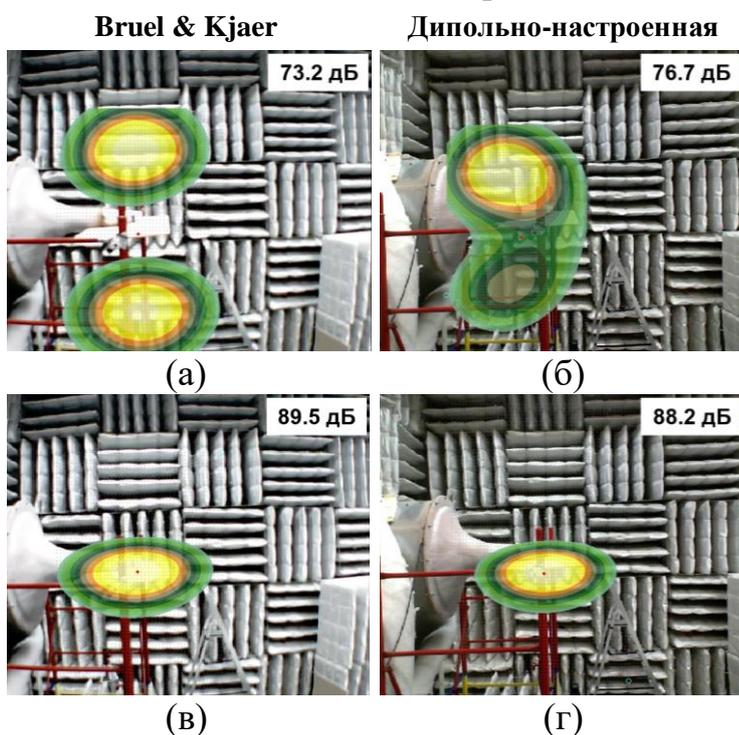


Рисунок 13 – Локализация шума взаимодействия потока и пластины.

Алгоритмы пост-обработки:

(а), (б) – монополярный; (в), (г) – дипольный

По анализу карт визуализации можно заключить, что результаты хорошо сопоставимы. На низких частотах, в диапазоне которых находится пик доминирующего источника (около 600 Гц), пятна локализации довольно большие, и на таких частотах, как правило, не проявляются ярко выраженные боковые лепестки, как это было в предыдущем случае со стержнем, что обычно связано с замещением значительной области плоскости наблюдения одним главным лепестком. Среднее значение уровня звукового давления локализуемого диполя составляет около 88.9 дБ, что хорошо соответствует значению (88.2 дБ), полученному с помощью метода азимутального разложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами в диссертационной работе, усовершенствована математическая модель для поиска оптимальных схем установки микрофонов в антенну для высокоэффективной локализации акустических диполей. Лежащее в основе модели использование функции рассеяния точки (PSF) для оценки боковых лепестков, полученных напрямую с карты локализации точечного диполя, позволяет производить оптимальную дипольную настройку микрофонной антенны с минимальным количеством необходимых вычислений, что обеспечивается за счет свойства продольного масштабирования радиального профиля PSF при изменении частоты в фиксированной области. Целевая функция показывает высокую чувствительность уровней боковых лепестков от положения установки микрофонов в решетку.

Важным результатом данной работы является разработка и изготовление конструкции лучевой микрофонной антенны, обладающей возможностью выбора числа лучей и числа микрофонов на лучах, а также проведения точного позиционирования микрофонов по угловой и радиальной координате. Данные особенности выгодно отличают разработанную антенну от аналогичных продуктов мировых производителей, позволяя использовать ее в научных исследованиях по верификации новых алгоритмов настройки плоских антенн с целью повышения качества локализации путем тестирования оптимального набора расположения микрофонов в экспериментальных условиях.

Для обеспечения тонкой настройки пост-обработки записанных акустических сигналов, выполнена разработка собственного программного обеспечения, которое демонстрирует сопоставимый с проприетарным ПО V&K функционал и вычислительную скорость, что достигается за счет применения набора функций и объектов, позволяющих решать широкий спектр задач цифровой обработки сигналов в матричной форме в многопоточном режиме.

Продемонстрировано, что применение апертурной сглаживающей функции с последующей ее трансформацией в диаграмму направленности позволяет выполнять построение контурного графика частотно-зависимого размещения боковых лепестков для микрофонных антенн с различной формой и апертурой. Апертурная сглаживающая функция для случая монопольной модели источника инвариантна к сдвигу и зависит лишь от одного аргумента (разницы проекций волновых векторов), что делает ее важнейшим инструментом в реализации вычислительных моделей, позволяющих отслеживать влияние положения микрофонов в решетке на диаграмму направленности в требуемом частотном диапазоне фактически в реальном времени. Данное обстоятельство является ключевым для реализации высокоэффективной монопольной настройки микрофонных антенн на основе различных вычислительных схем.

С помощью реализации математической модели настройки новой антенны на оптимальное качество локализации монополей, путем проведения ряда вычислений, была найдена оптимальная схема установки микрофонов в решетку. Экспериментальные исследования локализации монополей в акустической заглушенной камере показали, что разработанная антенна с оптимальной монопольной настройкой в комбинации с разработанным программным

обеспечением для пост-обработки дают результаты лучшие, чем коммерческая антенна и программное обеспечение В&К, что выражается в более компактной области локализации звуковых источников на карте.

Проведена реализация дипольного алгоритма пост-обработки, верифицированного на начальном этапе путем постановки вычислительного эксперимента. Установлено, что численное моделирование шума обтекания цилиндра для генерации модельного дипольно-индцируемого звукового поля показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными, полученными другими исследователями, и может быть использовано для валидации и отладки реализованного дипольного алгоритма пост-обработки.

Проведенный в лабораторных условиях сравнительный анализ карт локализации диполей, полученных с помощью коммерческой и новой антенны, настроенной для этих целей специальным образом, подтверждает прирост динамического диапазона, близкий к проведенным ранее теоретическим оценкам (около 2 дБ). В качестве механизма для генерации диполей рассматривалось взаимодействие воздушной турбулентной струи с твердым телом, в частности – обтекание тонкого металлического стержня цилиндрической формы, а также взаимодействие турбулентного потока с тонкой пластиной. В результате было получено визуальное подтверждение эквивалентности областей распределения источников на картах локализации, что свидетельствует об обеспечении сопоставимого разрешения с фирменной антенной подобного класса.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях перечня ВАК и в изданиях, входящих в международные базы данных научного цитирования Scopus и Web of Science

1. Берсенеv Ю.В., Вискова Т.А., Беvев И.В., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю., Ершов В.В., Бурдаков Р.В. Применение метода плоского бимформинга к идентификации вращающихся звуковых мод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 26-38. **(ВАК, Scopus)**

2. Ершов В.В. Верификация алгоритмов идентификации положения источников звука // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 105-108. **(ВАК)**

3. Ершов В.В. Проектирование конструкции лучевой микрофонной антенны с возможностью быстрой перенастройки её конфигурации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 11. – С. 20-23. **(ВАК)**

4. Копьев В.Ф., Храпцов И.В., Ершов В.В., Пальчиковский В.В. О возможности использования единичной временной реализации для исследования шума вихревых колец // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 1. – С.48-57. **(ВАК, Scopus, Web of Science)**

5. Ershov V.V., Palchikovskiy V.V. Comparison of beamforming algorithms based on localization of calibrating sound sources and air jet noise // International Journal of Engineering and Technology(UAE). – 2018. – Vol. 7, Iss. 2. – P. 119-123. **(Scopus)**

6. Ershov V., Palchikovskiy V. Designing planar microphone array for sound source localization // *Akustika*. – 2019. – Vol. 32. – P. 123-129. (**Scopus, Web of Science**)

7. Ershov V., Khramtsov I., Kustov O. Determination of monopole and dipole sources of flow around a cylinder using a virtual microphone array // *Akustika*. – 2021. – Vol. 39. – P. 78-83. (**Scopus, Web of Science**)

Публикации в других изданиях и сборниках научных конференций

8. Palchikovskiy V.V., Khramtsov I.V., Ershov V.V., Gornova D.A., Selivanova A.A. Aeroacoustic investigations of subsonic jet in PNRPU anechoic chamber // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 208, No. 012032. (**Scopus, Web of Science**)

9. Kopiev V.F., Bersenev Yu.V., Viskova T.A., Burdakov R.V., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Kustov O.Yu., Ershov V.V. Azimuthal Modes Measurement in an Intake Duct for a Turbofan Engine // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 273-277. (**Scopus, Web of Science**)

10. Ershov V.V., Palchikovskiy V.V., Kustov O.Yu. Localization of sound sources in turbulent jet by planar array with optimized arrangement of microphones // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2027, No. 040017. (**Scopus, Web of Science**)

11. Ershov V.V., Sorokin E.V., Palchikovskiy V.V., Korin I.A. Study of new beam microphone array operation based on aerodynamic noise sources localization // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). (**Scopus, Web of Science**)

12. Khramtsov I.V., Ershov V.V., Cherenkova E.S. Investigation of the position of noise sources in a turbulent subsonic jet using the beamforming technique // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). (**Scopus, Web of Science**)

13. Khramtsov I.V., Ershov V.V. Experimental study of noise of shielded and unshielded jets // *AIP Conference Proceedings*. – 2021. – Vol. 2351, No. 030059. (**Scopus**)

Свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ

14. Ершов В.В. Локализация источников звука методом Cross-Spectral Beamforming («CSB Localization») // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. – № 2018664971. – Правообладатель: ФГАОУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – Дата поступления заявки: 30.10.2018. – Дата регистрации: 27.11.2018.