## МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

## ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, профессор Копьев Виктор Феликсович

## ОГЛАВЛЕНИЕ

| ОГЛАВЛЕНИЕ   |
|--|
| ВВЕДЕНИЕ4  |
| ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ                   |
| ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКАНАЛЬНЫХ                            |
| ИЗМЕРЕНИЙ16  |
| 1.1. Проблема генерации шума применительно к двигательным установкам     |
| летательных аппаратов  |
| 1.2. Локализация источников звука на основе многоканальных измерений     |
| микрофонными антеннами   |
| 1.3. Математические основы метода Beamforming для локализации источников |
| звука  |
| Выводы по Главе 1  |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ                        |
| ЭФФЕКТИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА                                 |
| 2.1. Оценка эффективности существующих алгоритмов локализации источников |
| звука  |
| 2.2. Создание программного обеспечения для визуализации результатов      |
| локализации звуковых источников в пространстве                           |
| 2.3. Разработка и создание микрофонной антенны с возможностью            |
| перепозиционирования микрофонов для локализации источников звука 45      |
| Выводы по Главе 2  |
| ГЛАВА 3. НАСТРОЙКА МИКРОФОННОЙ АНТЕННЫ НА ОПТИМАЛЬНОЕ                    |
| КАЧЕСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗВУКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ МОНОПОЛЬНОГО                    |
| ТИПА   |
| 3.1. Алгоритмическая реализация методов пост-обработки для эффективной   |
| локализации звуковых источников монопольного типа                        |

3.2. Реализация математической модели для проведения настройки микрофонной антенны оптимальное качество локализации ЗВУКОВЫХ источников на 3.3. Настройка микрофонной антенны на оптимальное качество локализации 3.4. Экспериментальные исследования локализации источников шума монопольного типа в акустической заглушенной камере с помощью настроенной микрофонной антенны...... 68 ГЛАВА 4. НАСТРОЙКА МИКРОФОННОЙ АНТЕННЫ НА ОПТИМАЛЬНОЕ КАЧЕСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗВУКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ДИПОЛЬНОГО 4.1. Реализация алгоритма пост-обработки для эффективной локализации 4.2. Развитие математической модели настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации звуковых источников дипольного типа ....... 89 4.3. Настройка микрофонной антенны на оптимальное качество локализации 4.4. Экспериментальные исследования локализации источников шума дипольного типа в акустической заглушенной камере с помощью настроенной микрофонной антенны......100 Выводы по Главе 4 ...... 113 

#### введение

Актуальность исследования. Мировой разработки темы опыт летательных аппаратов показывает, что применяемым средствам и методикам, способствующим расширенному и глубокому пониманию механизмов генерации шума и акустических нагрузок, уделяется очень большое внимание. За рубежом практическая и экономическая эффективность данных методов крайне высока. Однако в России освоение и более тщательное исследование данной тематики Созлание новейших началось относительно недавно. отечественных пассажирских самолетов, удовлетворяющих сертификационным требованиям Международной организации гражданской авиации (англ. ICAO – International Civil Aviation Organization) по допустимому уровню создаваемого шума [1], области невозможно без перспективных применения технологий В шумоглушения. В связи с этим, разработка методов и средств для борьбы с авиационным шумом является на сегодняшний день особо актуальной задачей.

Одним ИЗ главных источников шума, создаваемого современным пассажирским самолетом в полете, является аэродинамический шум обтекания планера, который на режиме посадки сравним или даже превышает шум силовой установки самолета [2-4]. Возникновение такого шума обусловлено пульсациями аэродинамических сил на крыле, турбулентным пограничным слоем, вихрями, образующимися при обтекании поверхностей планера, а также турбулентными следами за плохо обтекаемыми телами [5]. При заходе на посадку, при выпущенных стойках шасси и отклоненных закрылках, основные источники шума обусловлены срывным обтеканием выступающих в поток элементов конструкции. При обтекании стоек шасси в определенном диапазоне чисел Рейнольдса за счет силового воздействия потока возникает заметное дипольное излучение звука в окружающую среду, направленность которого соответствует горизонтально ориентированному диполю [6]. Размерный анализ общего уравнения генерации звука потоком в присутствии твердых границ показывает, что аэродинамический представляющие собой ШУМ генерируют источники дипольного типа,

флюктуирующие силы, возникающие при взаимодействии потока с обтекаемым телом [7].

Для разработки эффективных средств подавления шума, создаваемого различными элементами летательного аппарата, 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 индуцируемого объектом шума с помощью многомикрофонных антенн [8]. Регистрируемые набором микрофонов амплитуды упорядоченным звукового давления обрабатываются определенными математическими алгоритмами, что в итоге позволяет с определенной степенью достоверности провести реконструкцию звукового поля и получить информацию о расположении в пространстве и уровне звукового давления источников шума в интересующих частотных полосах. В общепринятого обработки основе алгоритма акустических измерений (Conventional Beamforming) лежит предположение 0 монопольности И некоррелированности исследуемых звуковых источников [9], что является основным физическим допущением, определяющим границы применимости чтобы обойти данного метода. Для того, существующее ограничение монопольности, необходимо использовать модифицированный алгоритм, расширить область применения позволяющий его за счет адаптации математической модели к учету источников дипольного типа, что особенно актуально в задачах экспериментальной и вычислительной аэроакустики, связанных с обтеканием твердых тел различной конфигурации 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 ключевых критериев для оценки её применимости в требуемых условиях – величины разрешающей способности и обеспечиваемого динамического диапазона [9-12]. Максимальные значения данных критериев

можно получить путем оптимизации расположения координат микрофонов, проектными параметрами исходной целевой функции, являющихся В определяемой на основе радиального профиля диаграммы направленности. Путем постановки и решения задачи минимизации данной функции, можно добиться снижения максимальных уровней боковых лепестков, наличие которых ведет к появлению ложных пиков в конечной карте локализации. Поэтому хорошую конструкцию микрофонной антенны можно охарактеризовать низким максимальным уровнем бокового лепестка, измеренным относительно уровня главного лепестка.

Определение целевой функции основано на отклике микрофонной антенны на разницу проекций волновых векторов плоской волны, падающей с фокусного направления, и плоской волны, падающей с направления, отличного от фокусного. Путем обобщения данной функции с параметрами, учитывающими характерные особенности дипольно-индуцируемого звукового поля, можно провести корректировку диаграммы направленности для настройки микрофонной антенны на максимальную эффективность локализации дипольных источников шума с учетом ориентации их дипольного момента.

В связи с этим, целью данной 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 данных типов.

Степень разработанности темы. Существует ряд научных статей, посвященных локализации монопольных и дипольных источников звука с помощью метода многомикрофонных антенн. Например, измерение с помощью линейной микрофонной антенны шума аэроакустического диполя, создаваемого цилиндром в поперечном потоке, представлено в статье [13]. В данной работе стандартный монопольный алгоритм [8] был модифицирован путем фазовой коррекции для повышения его чувствительности к источникам дипольного типа и протестирован в различных условиях. Авторы подчеркивают, что путем данной

коррекции алгоритм локализации стал менее чувствительным к источникам других типов, а звуковая энергия, которая присутствовала в измерениях в результате других аэроакустических явлений, была ослаблена. Таким образом, имеется потенциал применения данного метода в качестве пространственного фильтра, однако существует вероятность получить ошибочные карты локализации при использовании данного алгоритма для источников, имеющих не дипольную модель излучения.

В работе [14] был использован метод «D-Beam» с коррекцией алгоритма на основе опорного модельного диполя, который используется в качестве входного параметра для работы метода (для определения приоритетной, наиболее вероятной ориентации диполя). С использованием данного подхода проведены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе с обтеканием цилиндра в различных пространственных положениях относительно набегающего потока для образования дипольных звуковых источников различной пространственной ориентации.

Специалистами ЦАГИ в заглушенной камере АК-2 [15, 16] был применен аналогичный подход применения собственного дипольного алгоритма [17, 18]. Главное отличие данного исследования – применение метода азимутальной декомпозиции [19-21] для оценки вклада отдельных азимутальных мод (и определения уровня их интенсивности) в общий уровень создаваемого шума при проведении классического эксперимента с обтеканием цилиндра воздушной струей [22]. Также в данной статье проведено экспериментальное исследование шума взаимодействия воздушной струи и пластины в качестве еще одного случая генерации звукового поля, близкого к дипольному по своим акустическим характеристикам [23].

В работе [24] подробно описан дипольный алгоритм, в основе которого лежит применение псевдообратной матрицы. Проведено тщательное сравнение эффективности локализации данного метода с другими общеизвестными алгоритмами (Conventional Beamforming [8, 25, 26], CLEAN-SC [27-29], Adaptive Beamforming [30, 31], DAMAS [32-34] и др.). Описаны результаты

экспериментального исследования шума взаимодействия турбулентной струи и закрылка при различных углах его отклонения (для имитации различных режимов полета, соответствующих взлету, посадке и крейсерскому режиму). Эффективность локализации различных типов звуковых источников с помощью данного алгоритма также подробно протестирована в работе [35] на модельных и экспериментальных звуковых сигналах.

Таким образом, исходя из обзора научной литературы по тематике локализации звуковых источников монопольного и дипольного типа, можно заключить, что экспериментальная и теоретическая база в данной области довольно хорошо проработана. Однако ни в одной из этих работ не уделяется настройке непосредственно самой микрофонной внимание антенны на оптимальное качество локализации акустических диполей (пространственное распределение микрофонов в которой, в совокупности с её апертурной характеристикой, являются определяющими параметрами, напрямую влияющими на величину разрешающей способности антенны), максимальное значение динамического диапазона, и, как следствие, на качество проведения локализации и реконструкции звуковых источников. Существует большое количество работ [9, 36-39], связанных с поиском оптимального расположения микрофонов в антенне, однако все они рассматриваются только в контексте локализации звуковых источников монопольного типа.

**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 натурных 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 измерений. Установлено, результатов проведенных антенна, ЧТО оптимизированная по усовершенствованной математической модели настройки на локализацию источников дипольного типа, дает прирост динамического диапазона до 2 дБ относительно известных моделей.

### Практическая значимость.

Разработанная математическая модель для поиска оптимального расположения микрофонов в плоской микрофонной антенне, обеспечивающего прирост ключевых параметров для повышения эффективности локализации монопольных И дипольных ЗВУКОВЫХ источников, в совокупности С реализованными математическими алгоритмами пост-обработки акустических сигналов, индуцируемых источниками монопольного и дипольного типа, позволяет расширить область применимости аппаратной и программной части системы локализации звуковых источников методом многомикрофонных антенн в задачах экспериментальной аэроакустики. 3a повышения счет степени подробности и снижения зашумленности финальных карт распределения шума в пространстве, а также за счет адаптации алгоритма пост-обработки к дипольноиндуцируемому звуковому полю, в лабораторных условиях экспериментально подтвержден прирост эффективности локализации шума различного типа с помощью применения созданного инструментария. Разработанный 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 обтекания стоек шасси или при поиске распределенных источников шума на элементах механизации крыла. Повышение точности применяемых средств проведения измерений за счет описанных в работе методов может помочь в выборе оптимальных конструктивных схем компоновки элементов планера летательных аппаратов, что в конечном итоге будет

способствовать модернизации существующих и разработке перспективных методов шумоглушения гражданских самолетов для удовлетворения требованиям ИКАО по максимально допустимому уровню создаваемого лайнерами шума. Разработанный программный аппаратный И измерительный комплекс, обладающий вариативностью настройки к условиям проведения и пост-обработки эксперимента, обеспечивает качество локализации, не уступающее существующим мировым аналогам, и может быть использован в рамках импортозамещения существующего 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 характеристикам демонстрирует своим спектральным высокую степень реальным дипольно-индуцируемым звуковым полем, соответствия с 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 натурных 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» (Planar Beamforming). Экспериментальные исследования выполнены с использованием современного измерительного оборудования и программного обеспечения. Поиск оптимального набора координат микрофонов В антенне выполнялся использованием методов решения задач условной оптимизации с помощью общеизвестного алгоритма (Minimax Optimization).

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов постобработки 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» (АСО-2018, АСО-2020, АСО-2021) (г. Москва, 2018; г. Москва, 2020; г. Москва, 2021), 19-й и 20-й международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2018, ICMAR 2020, ICMAR 2022) (г. Новосибирск, 2018; г. Новосибирск, 2020;

г. Новосибирск, 2022), международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (DVM2020) (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; г. Пермь, 2017; 2019), 5-ой Всероссийской г. Пермь, 2018; Г. Пермь, конференции С международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения» (г. Пермь, 2018), 6-й открытой всероссийской конференции по аэроакустике (г. Звенигород 2019); 3-й международной научной 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 учеными, обучающимися молодыми 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 постановка условий проведения измерений, а также экспериментальных исследований, были выполнены автором лично. Проектирование и сборка разработанной универсальной конструкции микрофонной антенны, реализация численного моделирования, а также подготовка и настройка оборудования для проведения экспериментов в заглушенной камере, выполнялись при участии ПНИПУ. сотрудников Центра акустических исследований 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.

В первой главе диссертации рассмотрено состояние вопроса о проведении исследований по локализации источников звука с помощью многомикрофонных антенн, генерации источников шума, описаны механизмы создаваемого летательными аппаратами на различных режимах полета, приведены математические основы процедуры пост-обработки акустических данных с помощью традиционного алгоритма для построения карт локализации источников шума (Conventional Beamforming).

Во второй главе представлена разработка программного обеспечения с поддержкой необходимых алгоритмов, настроек и регулировок, недоступных в проприетарном программном продукте. Проведена оценка качества локализации источников шума с помощью существующих методов для принятия решения о целесообразности их реализации в программном коде. Выполнено проектирование и создание универсальной конструкции микрофонной антенны с поддержкой внесения конструктивных изменений в зависимости от условий проведения эксперимента.

В третьей главе описано проведение разработки алгоритмов пост-обработки и математической модели для проведения настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации звуковых источников монопольного типа. Реализовано проведение оптимальной настройки антенны, после чего проведены экспериментальные исследования локализации источников шума монопольного типа в акустической заглушенной камере с использованием данной антенны.

В четвертой главе разработан и валидирован метод проведения настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации дипольных источников. Проведены экспериментальные исследования локализации источников шума дипольного типа, сгенерированные в заглушенной камере с

помощью обтекания дозвуковым турбулентным воздушным потоком тонкого металлического стержня и тонкой прямоугольной пластины. Для подтверждения работоспособности разработанного метода проведен сравнительный анализ полученных карт локализации с результатами, полученными с помощью антенны, настроенной традиционным образом.

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Перед началом проведения исследований по разработке средств и методов акустических измерений, необходимо, во-первых, подробно рассмотреть особенности генерации источников шума, создаваемого летательными аппаратами, и, во-вторых, провести обзор уже существующих аппаратных и программных комплексов для локализации источников шума.

# 1.1. Проблема генерации шума применительно к двигательным установкам летательных аппаратов

Мировой опыт разработки летательных аппаратов показывает, ЧТО применяемым средствам и методикам, способствующим расширенному и глубокому пониманию механизмов генерации шума и акустических нагрузок, уделяется очень большое внимание. С развитием научно-технического прогресса повышается максимальная мощность энергетических и двигательных установок, что, как следствие, приводит к обширному шумовому загрязнению окружающей среды. Воздействие данного фактора негативно отражается как на здоровье человека, так и на процессах, протекающих в живой природе, путем возможного нарушения равновесия в экосистеме, что напрямую влияет на экологическую ситуацию в мире. Негативное воздействие авиационного шума, возрастающее с непрерывным ростом интенсивности эксплуатации воздушного транспорта в коммерческих целях, является на сегодняшний день одной из важнейших проблем, выдвигаемых ведущими организациями по защите и обеспечению безопасности окружающей среды.

Международные нормы по допустимым уровням излучения авиационного шума, воздействующего на окружающую среду, регламентируются Международной организацией гражданской авиации ИКАО (от англ. ICAO – International Civil Aviation Organization). В рамках этой организации создан Технический комитет по защите окружающей среды от воздействия авиации КАЕП (от англ. CAEP – Committee on Aviation Environmental Protection), занимающийся проблемами снижения авиационного шума и нормирования эмиссии вредных выбросов из авиационных двигателей. Авиационный шум контролируется с 1970-х годов путем введения предельно допустимых уровней шума для самолетов, содержащихся в Приложении 16 к Конвенции о международной гражданской авиации [1]. Основная цель сертификации вводимых в эксплуатацию самолетов по нормам авиационного шума состоит в том, чтобы обеспечить гарантированное применение новейших и актуальных технологий по этапе разработки конструкции снижению шума на воздушного судна, максимальный эффект от применения которых, в первую очередь, должен проявляться в снижении шума в зоне вокруг аэропортов. Путем поэтапного ужесточения нормативных требований по допустимому уровню шума на местности реализуется ограничение и запрет эксплуатации в международных аэропортах пассажирских самолетов, не соответствующих указанным нормативам и обладающих высокими уровнями шумового воздействия.

Следует отметить, что, согласно сводному заявлению о постоянной политике и практике ИКАО в области уменьшения уровня шума и эмиссии самолетов гражданской авиации, достигнуты значительные успехи: например, благодаря существенному техническому прогрессу, уровень шума выпускаемых в настоящее время воздушных судов уменьшился на 75% по сравнению с воздушными судами 1960-х годов [40]. С 2018 года вступили в силу ограничения по авиационному шуму Главы 14 Тома I Приложения 16 ИКАО, вследствие чего дополнительно ограничиваются суммарные уровни шума на местности тяжелых дозвуковых реактивных гражданских самолетов (c максимальной сертифицированной взлетной массой 55000 кг и более) на 7 EPNdB; с 2021 года данное ограничение применяется также и к дозвуковым реактивным самолетам с максимальной сертифицированной взлетной массой от 8618 до 55000 кг [1].

Ужесточение нормативных требований по допустимому уровню авиационного шума стимулирует научно-исследовательскую, опытноконструкторскую и технологическую работу в области разработки новейших

методов и средств, направленных на улучшение акустических характеристик воздушных судов для обеспечения их безопасности и конкурентоспособности на мировом рынке авиаперевозок. Практическая и экономическая эффективность данных методов крайне высока. Таким образом, создание новейших отечественных пассажирских самолетов, удовлетворяющих сертификационным требованиям ИКАО по допустимому уровню создаваемого шума, невозможно без применения перспективных технологий в области шумоглушения.

Во второй половине XX века, на раннем этапе развития гражданской авиации, в качестве силовых установок магистральных самолетов использовались компактные газотурбинные одноконтурные турбореактивные двигатели. Доминирующим источником шума такого двигателя являлся шум, порождаемый высокоскоростной турбулентной струей, истекающей из реактивного сопла, который генерируется за счет активного перемешивания высокотемпературного потока с окружающей средой [41-42]. Дальнейшее развитие газотурбинных двигателей было обусловлено, в первую очередь, стремлением обеспечить снижение расхода топлива, на что приходилось до 40% эксплуатационных расходов [43]. Данное обстоятельство подтолкнуло к активному введению в турбореактивных эксплуатацию двухконтурных двигателей, обладающих большим КПД на дозвуковых скоростях полета. До 1980-х гг. снижение уровней шума турбореактивных двигателей с низкой степенью двухконтурности, не превышающей 2, и сравнительно малым диаметром вентилятора, достигалось путем применения смесителей, обеспечивающих перемешивание потоков газа, поступающих из внешнего (после вентилятора) и внутреннего (после турбины) контуров до выхода из общего реактивного сопла. Вследствие снижения скорости истечения реактивной струи, достигалось и значительное снижение уровня генерируемого ей шума, так как мощность звука, создаваемая дозвуковой струей двигателя, пропорциональна скорости истечения струи в восьмой степени (по закону Лайтхилла) [44]. Вторым по значимости источником звука на режиме влета являлся шум, создаваемый вентилятором (компрессором), который на режиме посадки становился уже доминирующим.

Постепенное развитие конструкции турбореактивных двигателей В 1980-1990-х гг. привело к тенденции повышения степени двухконтурности используемых силовых установок до 4 – 6 и, как следствие, к перераспределению вклада отдельных акустических источников в общий шум самолета. При снижении интенсивности шума выхлопной струи и при увеличении диаметра вентилятора (для компенсации потери тяги из-за уменьшения степени повышения давления в вентиляторе), на режимах взлета и посадки в качестве доминирующего источника шума начал выступать шум вентилятора, излучающий в переднюю и заднюю полусферы. Данное обстоятельство подтолкнуло к активной разработке звукопоглощающих конструкций различного типа, применение которых в наружном контуре и в трактах двигателя позволяет значительно снизить широкополосный и тональный шум, создаваемый вентилятором, а также шум, порождаемый камерой сгорания, турбиной и компрессором. Путем комплексного применения различных методов и средств (например, за счет применения малошумной формы воздухозаборника; окружной снижения скорости вентилятора, акустических, оптимизации весовых конструктивных И характеристик панелей звукопоглощающих конструкций облицовки ДЛЯ наружного контура; оптимизации формы, стреловидности и числа лопаток, а также модернизации технологических процессов их изготовления; снижения эффектов взаимодействия неоднородных потоков, натекающих на лопатки), уже в 1990-х гг. удалось добиться снижения интенсивности шума вентилятора практически до уровня интенсивности шума истечения реактивной струи на режиме взлета [2].

К настоящему акустических времени развитие конструктивных И характеристик современных двухконтурных турбореактивных двигателей достигло существенных результатов. Отличительной чертой новейших силовых установок, устанавливаемых на магистральные самолеты, стала реализация еще более высокой степени двухконтурности (в диапазоне 5 – 12). Вследствие данного обстоятельства интенсивность шума реактивной струи стала еще ниже, а непрерывное увеличение диаметра вентилятора (из-за снижения степени

повышения давления в вентиляторе) стало ограничиваться требованиями к минимальному расстоянию от двигателя до взлетно-посадочной полосы при наиболее распространенном расположении силовой установки – под крылом. Из-за высокой эффективности применяемых средств шумоподавления, уровень шума, создаваемый камерой сгорания и турбиной низкого давления в задней полусфере, практически эквивалентен стал уровню шума, создаваемого вентилятором на режиме взлета. Вклад отдельных звуковых источников, создаваемых элементами двигательной установки и планера, в общий шум самолета на режиме взлета и посадки представлен на рисунке 1. Шаг сетки по оси ординат составляет 5 EPNdB.





Посадка

Рисунок 1 – Ранжирование источников шума, создаваемых элементами двигательной установки и планера относительно суммарного шума самолета на

режиме взлета и посадки [45]

Общая тенденция к снижению шума двигателя привела к тому, что данный шум больше не является доминирующим на всех режимах – теперь на режиме захода на посадку аэродинамический шум обтекания планера становится сопоставимым, а иногда даже превышает шум силовой установки [46-48]. Возникновение такого шума обусловлено пульсациями аэродинамических сил на крыле, турбулентным пограничным слоем, вихрями, образующимися при обтекании поверхностей планера, а также турбулентными следами за плохо обтекаемыми выступами. При заходе на посадку, при выпущенных стойках шасси и отклоненных закрылках, основные источники шума обусловлены срывным обтеканием выступающих в поток элементов конструкции. При обтекании стоек шасси в определенном диапазоне чисел Рейнольдса за счет силового воздействия потока возникает заметное дипольное излучение звука в окружающую среду, направленность которого соответствует горизонтально ориентированному диполю [6]. Размерный анализ общего уравнения генерации звука потоком в присутствии твердых границ показывает, что аэродинамический шум генерируют источники дипольного типа, представляющие собой флюктуирующие силы, возникающие при взаимодействии потока с обтекаемым телом [7]. Таким образом, снижение акустического воздействия, создаваемого современным магистральным самолетом, является комплексной задачей, для решения которой необходима разработка новейших методов по шумоглушению двигательной установки в совокупности с повышением аэродинамического качества элементов конструкции летательного аппарата.

В первом случае, применяется ряд различных методов, направленных на снижение интенсивности генерируемого двигателем шума, таких как: изменение начальных условий истечения реактивной струи [49-52] (например, за счет применения шевронных и гофрированных сопел); повышение эффективности шумоглушения в каналах двигателя с помощью звукопоглощающих конструкций путем определения оптимального импеданса [53-56]; поиск оптимальной формы, стреловидности и числа лопаток вентилятора и статора; модернизация

технологических процессов изготовления основных конструктивных элементов авиационного двигателя; разработка и применение глушителей шума, и так далее.

Во втором случае, определяется оптимальная конструкция элементов планера, шасси и механизации крыла, обеспечивающая снижение интенсивности создаваемого шума при их обтекании воздушным потоком. Взаимодействие элементов механизации с потоком приводит к генерации как низкочастотных дискретных составляющих, образующихся за счет срыва вихрей с нижней кромки предкрылка, так и к усилению шума в области высоких частот, создаваемого вследствие образования мелкомасштабной турбулентности в щелевом потоке при обтекании устройств для отклонения поверхностей предкрылка [19]. В случае размещения двигателя под крылом определенным образом, при отклонении закрылков на различных режимах может возникнуть эффект взаимодействия их задних кромок с реактивной струей (Jet-Flap Interaction), ведущий к усилению шума на низких и средних частотах до 10 дБ [57-60], что также необходимо учитывать при выборе компоновки воздушного судна. При обтекании потоком шасси происходит генерация низкочастотного шума взаимодействия, который может быть снижен за счет оптимального выбора геометрических параметров конструкции (например, угла наклона и длины стойки шасси). Однако следует помнить, что при внесении любых изменений в конструкцию элементов планера с целью снижения создаваемого ими шума, аэродинамические И летные характеристики самолета не должны быть ухудшены.

Таким образом, разработка и реализация новейших методов и средств задачей, шумоглушения является комплексной зависящей OT множества различных решения которой факторов, ДЛЯ активно применяются как экспериментальные (от имитации условий проведения полета на маломасштабных моделях в заглушенной камере до полномасштабных летных испытаний), так и численные методы исследования. Однако следует помнить, что качественная постановка эксперимента невозможна без разработки новых средств проведения измерений и алгоритмов для последующей пост-обработки регистрируемых акустических данных, что и является основной целью настоящей работы.

# 1.2. Локализация источников звука на основе многоканальных измерений микрофонными антеннами

исследования, разработки и реализации Для эффективных средств подавления шума, создаваемого различными элементами летательного аппарата, необходимо обладать информацией об источниках излучения: о механизмах генерации данного шума, его спектральных характеристиках, а также о распределении звуковых источников в пространстве. Существуют различные способы для достижения данной цели. Одним из таких методов является использование многомикрофонных антенн [3, 8, 61-64]. Микрофонная антенна представляет собой набор акустических датчиков, упорядоченных между собой определенным образом, для регистрации звукового давления на известном расстоянии от плоскости расположения предполагаемых источников. После проведения процедуры пост-процессинга набора полученных звуковых сигналов, становится возможным реконструировать звуковое поле на основе модельных представлений о типах и распространении рассматриваемых источников. Постобработка выполняется с помощью математических алгоритмов [9, 27-35], позволяющих получить информацию о распределении акустических источников в исследуемой области пространства, спектральных характеристиках в различных точках данной области, также об уровнях ЗВУКОВОГО a давления на представляющих интерес частотах [65, 66]. Для большей наглядности, применения традиционного пост-обработки упрощенная схема метода (Conventional Beamforming) в частотной области для построения карты локализации источников шума представлена на рисунке 2 [67].

Наличие значительных достижений, полученных в ходе выполнения экспериментальных работ и проведения натурных экспериментов ведущими мировыми аэроакустическими центрами, доказывает, что метод многомикрофонных антенн является эффективным бесконтактным средством получения информации о звуковых источниках, создаваемых различными объектами, что в совокупности с последующим применением современных методов шумоглушения делает его мощным инструментом в борьбе с нежелательным акустическим воздействием.



Рисунок 2 – Упрощенная схема реализации метода Conventional Beamforming в частотной области для построения карты локализации источников шума

В настоящее время мировые производители предлагают большой выбор акустических решеток для различных применений, который варьируется от маленьких двухмикрофонных установок до решеток с несколькими сотнями микрофонов. Для конкретного применения необходимо настраивать полную аппаратную и программную систему с необходимыми требованиями, включая саму антенну, программное обеспечение для анализа и систему позиционирования. При выборе микрофонной антенны следует учитывать ряд важных факторов [68]:

место проведения измерений (интерьер кабины, в помещении, на открытом пространстве, под водой);

- интересующий частотный диапазон;

- требуемое разрешение в карте локализации источников шума;
- расстояние до источника (ближнее или дальнее поле);
- тип источника (стационарный или движущийся).

Сферические микрофонные антенны (рисунок 3) применяются для построения обзорной звуковой карты в ограниченных и обладающих частичным поглощением пространствах, например, в кабинах автомобилей и самолетов. Сферическая антенна позволяет за одно измерение получить полную ненаправленную карту шума в любых акустических условиях. Для этого применяется построенный на базе сферических алгоритм, гармоник. Одновременно с этим, установленные на сфере камеры выполняют фотосъемку окружающего пространства, изображения с которых используются в качестве полученной карты визуализации акустического фона шума. Построение сферической диаграммы направленности может применяться как в свободном акустическом поле, так и в поле с реверберацией.



Рисунок 3 – Сферическая микрофонная антенна

Круглые микрофонные антенны (рисунок 4) в зависимости от области применения диаметрами производятся с различными и конфигурациями установки микрофонов. Эти антенны работают совместно с программой формирования диаграммы направленности и предназначены для получения сохранении оптимальных результатов при максимальной простоты использования. Некоторые антенны могут использоваться в измерениях с применением метода акустической голографии, при условии, что антенна может быть размещена достаточно близко к источнику шума. Также применяются

полукруглые антенны, в тех случаях, когда существенное влияние оказывают отражения от земли – например, когда измерения выполняются вблизи автомобиля при испытании на проезд или при моделировании движения высокоскоростного поезда в аэродинамической трубе.



Рисунок 4 – Круглая плоская антенна

Портативные микрофонные антенны (рисунок 5) позволяют измерить звуковые поля в непосредственной близости к источнику шума, а также в ограниченных пространствах, например, при обнаружении шумовых «утечек» и построении конформных (с сохранением локальных угловых взаимосвязей) карт внутри автомобилей или вблизи сложных механизмов. Производятся антенны с различным шагом (от 25 до 40 мм), соответствующие различным частотным диапазонам локализации, а также двусторонние антенны, облегчающие измерения в реверберационной акустической обстановке.



Рисунок 5 – Портативная микрофонная антенна

Периодические микрофонные антенны с периодическим расположением (микрофонов гидрофонов) акустических датчиков или наиболее часто применяются для измерения стационарных звуковых полей рядом с объектом испытания (рисунок 6). Особо высокая точность покрытия измерительными достигается при использовании роботизированной точками системы ДЛЯ управления антенной. Это позволяет при помощи программы построения ближнем акустической голографии В поле построить звуковую карту, обладающую очень высокой пространственной разрешающей способностью.



Рисунок 6 – Периодическая микрофонная антенна

Складные лучевые микрофонные антенны (рисунок 7), сочетающие в себе большую измерительную площадь и простоту транспортировки, применяются для измерения крупногабаритных источников шума вне помещений. Антенна может быть либо полностью плоской, либо ее лучи могут быть направлены под углом, образуя конус, который позволяет подавить внешний, идущий с задней части антенны шум, на величину до 10 дБ в зависимости от частоты.



Рисунок 7 – Складная лучевая микрофонная антенна

В настоящей работе подробно рассматриваются именно лучевые микрофонные антенны, что связано с возможностью использования антенны данного типа (Bruel & Kjaer Type WA-1676-W-003), имеющейся в Центре акустических исследований ПНИПУ [69-73], в лабораторных условиях.

B основе общепринятого алгоритма пост-обработки акустических измерений (Conventional Beamforming), полученных с помощью используемой микрофонной антенны, лежит предположение 0 монопольности И некоррелированности исследуемых звуковых источников, что является основным недостатком данного метода. Для того чтобы обойти существующее ограничение, необходимо использовать модифицированный алгоритм, позволяющий

расширить область его применения за счет учета источников дипольного типа, что особенно актуально в экспериментальных задачах аэроакустики, связанных с обтеканием твердых тел различной конфигурации турбулентными потоками.

На степень достоверности и подробности получаемой карты локализации напрямую влияют два фактора: выбор типа микрофонной антенны и ее параметров, а также алгоритма пост-обработки регистрируемого микрофонами ЗВУКОВОГО давления для построения карт И получения спектральных [74, 75]. Наиболее характеристик исследуемых источников широкой применимостью обладает классический метод пост-обработки («Delay-and-sum», или «Conventional Beamforming») [8, 76]. Однако он обладает сравнительно низкой разрешающей способностью, снижает общую что точность локализации [77]. В настоящее время активно развиваются исследования в области поиска новых, более эффективных методов пост-обработки. Разработано большое число алгоритмов, позволяющих добиться существенного улучшения карт локализации за счет преодоления предела пространственного разрешения стандартного бимформинга [78-81].

Помимо развития новых методов пост-обработки, для повышения качества локализации также активно развиваются методы настройки микрофонных антенн с целью поиска оптимального распределения микрофонов в антенне [9, 36, 82, 83]. Выбор положений микрофонов напрямую влияет на детализированность финальной карты локализации за счет воздействия на уровни пиков паразитных боковых лепестков, которые в определенных случаях могут быть ошибочно приняты за предполагаемые акустические источники. Кроме того, необходимо обеспечить высокую разрешающую способность антенны для качественного разделения близкорасположенных звуковых источников между собой. Таким образом, основная задача оптимизации – добиться оптимального сочетания значений динамического диапазона в совокупности с высокой высоких разрешающей способностью антенны. Для достижения данной цели различные исследователи применяют различные алгоритмы оптимизации (с учетом мощностей, скорости оптимальных затрат вычислительных сходимости,

способности алгоритма к преодолению локальных минимумов целевой функции и так далее). Применяются такие методы, как минимаксная оптимизация [37, 84], метод дифференциальной эволюции [38], являющийся одним из вариантов генетического алгоритма [85, 86], выпуклая оптимизация [87], численные методы глобальной оптимизации, например, алгоритм имитации отжига (Simulated Annealing) в комбинации с применением внутриблочного метода Монте-Карло (Intra-Block Monte Carlo) [88], а также многие другие [89-91].

После проведения оптимизации положения существует микрофонов, несколько способов проверить эффективность локализации полученной конфигурации антенны: путем построения аналитической модели, проведения натурного эксперимента, либо путем постановки вычислительного эксперимента. Следует помнить, что на практике, при проведении натурного эксперимента, микрофонной эффективность реальная антенны может отличаться OT оптимальной в различной степени по причине влияния множества различных факторов. Например, из-за погрешности установки микрофонов, несоответствия реального звукового поля заданному в математической модели, невыполнения условий свободного поля, наличия кривизны фронта звуковых волн, а также из-за влияния других факторов в зависимости от условия проведения измерений.

Для проведения натурных экспериментов антенну необходимо собрать, установить в нее микрофоны, откалибровать их, подключить питающие кабели, анализаторы и веб-камеру, подготовить источник для генерации звукового поля, выполнить акустические измерения и провести пост-обработку результатов. Данные действия занимают существенное количество времени, а если оптимизированных наборов несколько, и антенна не обладает способностью к быстрому перепозиционированию микрофонов [92], то временные затраты возрастут еще больше. Поэтому для экономии времени предварительное подтверждение заявленной эффективности оптимизированных антенн лучше проводить на аналитических моделях, либо с помощью вычислительного эксперимента.

### 1.3. Математические основы метода Beamforming для локализации

### источников звука

Классический метод обработки акустических сигналов (Conventional Beamforming) является эффективным методом пост-процессинга, с помощью которого можно определить положение, уровень звукового давления и частоту звукового источника. Данный метод обладает широкой применимостью и позволяет проводить акустические исследования в широком спектре задач. Однако следует помнить, что одним из важнейших допущений любого алгоритма является выбор модели звукового источника. Соnventional Beamforming в общем случае предполагает, что в каждой точке дискретной сетки находится монопольный источник с неизвестной амплитудой. Монопольный источник в частотной области можно описать выражением [93]:

$$p(\vec{x},\omega) = \frac{a(\omega)e^{-i\omega\Delta t_e}}{4\pi \|\vec{x}-\vec{\xi}\|},$$

где  $a(\omega)$  – амплитуда давления, i – мнимая единица,  $\omega$  – круговая частота,  $\Delta t_e$  – временная задержка излучения,  $\vec{x}$  – положение микрофона,  $\vec{\xi}$  – положение монополя. В более общем виде данное выражение можно записать как:

$$p(\vec{x},\omega) = a(\omega)g(\vec{x},\omega),$$

где  $g(\vec{x}, \omega)$  является направляющей функцией, связывающей между собой координаты точечной сетки и позиции микрофонов в антенне на представляющих интерес частотах с определенной временной задержкой. Массив звуковых давлений, регистрируемых каждым микрофоном в антенне, можно записать в виде *N*-мерного вектора **р** (где *N* – общее число микрофонов):

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1(\omega) \\ \vdots \\ p_N(\omega) \end{pmatrix}$$

На основе данного вектора можно записать матрицу взаимных спектров С:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2} \mathbf{p} \mathbf{p}^*, \tag{1}$$

где (...)<sup>\*</sup> означает комплексно-сопряженное транспонирование.

Далее проводится приближение модельного вектора давлений к экспериментальному за счет выбора величин амплитуд. Функцию ошибок (Error Function) – расхождений между экспериментально полученными данными с их теоретическим представлением – можно записать как [9]:

$$J = \left\| \mathbf{p} - \overline{a} \mathbf{g} \right\|^2$$

где **g** является направляющим вектором, содержащим в себе компоненты  $g_n = g(\vec{x}, \omega)$ .

С помощью минимизации данной нормы методом наименьших квадратов можно получить решение для нахождения набора комплексных амплитуд:

$$\overline{a} = \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{p}}{\left\|\mathbf{g}\right\|^2}$$

Конечной величиной для нанесения на карту локализации являются расчетные мощности источников, которые выражаются через комплексные амплитуды в виде:

$$\overline{A} = \frac{1}{2} |\overline{a}|^2 = \frac{1}{2} \overline{a} \overline{a}^* = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{p}}{\|\mathbf{g}\|^2} \right) \left( \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{p}}{\|\mathbf{g}\|^2} \right)^* = \frac{1}{2} \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{p} \mathbf{p}^* \mathbf{g}}{\|\mathbf{g}\|^4} = \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{C} \mathbf{g}}{\|\mathbf{g}\|^4}.$$
(2)

Выражение (2) является аналитическим решением для расчетной мощности сигналов в каждой точке виртуальной дискретной сетки.

Представленная модель звукового источника может быть использована не только для монополей, но и для диполей, квадруполей и мультиполей путем модификации компонентов направляющей функции  $g(\vec{x}, \omega)$ . Поэтому для оценки мощности дипольных источников направляющий вектор **g** должен быть скорректирован с учетом дипольного момента  $a(\omega)l = 1$ . Таким образом, отдельная компонента направляющего вектора будет равна [14]:

$$g_n = \frac{e^{-i\omega\Delta t_e}}{4\pi \vec{r} l} i\omega l \nabla (\Delta t_e),$$

где *l* – расстояние между предполагаемыми монополями с оппозитной фазой,  $\vec{r} = \|\vec{x} - \vec{\xi}\|$  – вектор распространения излучения от источника до микрофона.

Метод Cross-Spectral Beamforming характеризуется обнулением автоспектральных (диагональных) элементов из матрицы взаимных спектров, так как эти составляющие содержит собственный шум отдельных микрофонов [9]:

$$A_{j} = \frac{\mathbf{g}_{j}^{*} \mathbf{C} \mathbf{g}_{j}}{\sum_{(m,n)\in S, m\neq n} \left| g_{nj} \right|^{2} \left| g_{nj} \right|^{2}},$$
(3)

где j – индекс точки дискретной сетки; m, n – текущие индексы микрофонов, S – подмножество всех возможных (m, n)-комбинаций;  $\overline{\mathbf{C}}$  – квадратная матрица взаимных спектров с размерностью  $[N \times N]$  с обнуленной главной диагональю, содержащая в себе все комбинации акустических сигналов  $C_{mn}$   $(m \neq n)$  в частотной области на определенной частоте.

Метод DAMAS (сокр. от The Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources) [32-34] – метод деконволюции, который позволяет увеличить предел пространственного разрешения классического метода Conventional Beamforming за счет ряда математических преобразований с использованием обратной свертки. Задача сводится к системе линейных уравнений, где алгоритм предполагает, что некогерентные монополи с различной комплексной амплитудой составляют исходную область источника:

$$\begin{bmatrix} |\overline{A}_{1}| \\ \vdots \\ |\overline{A}_{J}| \end{bmatrix} = \frac{1}{\|\mathbf{g}\|^{4}} \begin{bmatrix} |\mathbf{g}_{1}^{*}\mathbf{g}_{1}^{-1}|^{2} & \cdots & |\mathbf{g}_{1}^{*}\mathbf{g}_{J}^{-1}|^{2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ |\mathbf{g}_{J}^{*}\mathbf{g}_{1}^{-1}|^{2} & \cdots & |\mathbf{g}_{J}^{*}\mathbf{g}_{J}^{-1}|^{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |\overline{q}_{1}| \\ \vdots \\ |\overline{q}_{J}| \end{bmatrix}.$$

Здесь  $|\overline{q}_j|$  и  $|\overline{A}_j|$  – неизвестная мощность сигнала и оценка мощности сигнала стандартным методом Conventional Beamforming в *j*-й точке дискретной сетки соответственно;  $\mathbf{g}_j$  – направляющий вектор в *j*-й точке дискретной сетки; *J* – общее число элементов дискретной сетки. Решение системы сводится к матричному уравнению вида  $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$  и выполняется итеративно методом Гаусса-Зейделя. При каждой последующей итерации все отрицательные приближения приравниваются к нулю.

В настоящее время активно развиваются исследования в области поиска новых, более эффективных методов пост-обработки. Разработано большое число алгоритмов, позволяющих добиться существенного улучшения карт локализации за счет преодоления предела пространственного разрешения стандартного метода; например, в методах CLEAN-SC и NNLS (Non-Negative Least Squares – неотрицательный метод наименьших квадратов) результаты Conventional Beamforming являются исходными данными для построения очищенных карт локализации путем применения итеративных методов пост-обработки и методов деконволюции [77, 94-99].

#### Выводы по Главе 1

1. Ранжирование источников шума, создаваемого современными свидетельствует магистральными самолетами, 0 сопоставимых уровнях аэродинамического шума обтекания планера с шумом двигательной установки на режиме посадки. За счет силового воздействия потока с обтекаемым телом может возникать заметное дипольное излучение звука в окружающую среду, для бесконтактной диагностики которого необходима разработка новейших аппаратных и программных средств с целью проведения высокоточных измерений акустических диполей.

2. Существующие пост-обработки регистрируемого алгоритмы микрофонными антеннами звукового давления обладают различной степенью детализации построения карт локализации звуковых источников, а также вычислительной Поэтому дальнейшая различной сложностью. оценка применимости того или иного алгоритма в запланированных экспериментальных работах будет проведена для 3-х наиболее применимых в мировой практике методов: классического Conventional (Delay-and-Sum) Beamforming, его модификации Cross-Spectral Beamforming, усовершенствованной а также итеративного метода деконволюции DAMAS.

3. Порядок установки измерительных датчиков в решетку, непосредственно формирующую конструкцию микрофонной антенны, позволяет обеспечить вариативность ключевых параметров, определяющих область применимости той или иной антенны в необходимых пользователю условиях. Выбор типа и числа микрофонов, а также оптимизация их положения в решетке, является важнейшей задачей, требующей пристального внимания. В качестве основного объекта для работе проведения исследований В настоящей будет рассматриваться микрофонная антенна лучевого типа, что связано с рядом ощутимых преимуществ (например, с возможностью охвата большой измерительной площади) при относительной простоте её конструкции, а также с возможностью использования антенны данного типа (Bruel & Kjaer Type WA-1676-W-003) в лабораторных условиях.

# ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

Для разработки программного комплекса, имеющего способность к применению необходимых алгоритмов, настроек и регулировок, недоступных в проприетарном программном обеспечении, требуется провести оценку качества локализации источников шума с помощью существующих методов и оценить целесообразность их реализации в программном коде. Для разработки аппаратного комплекса, поддерживающего внесение конструктивных изменений в зависимости от условий проведения эксперимента, требуется проектирование и создание универсальной конструкции микрофонной антенны.

# 2.1. Оценка эффективности существующих алгоритмов локализации источников звука

Представленные в предыдущей главе алгоритмы пост-обработки были оформлены в виде программного кода и реализованы в пакете математического моделирования MathWorks MATLAB. Обоснованием этого решения является необходимость вычисления больших массивов данных в матричной форме, с которыми данный программный пакет работает в режиме распараллеливания потоков на ядра процессора; таким образом, достигается минимальное время обработки вычислений. Также данный программный пакет включает в себя множество встроенных функций для цифровой обработки сигналов, в том числе и для выполнения быстрого преобразования Фурье.

Работоспособность программного обеспечения тестировалась на наличие возможных сбоев и ошибок, вместе с этим параллельно проводилась работа по оптимизации скорости вычислений созданного приложения. В конечном итоге, можно заключить, что разработанный программный продукт обладает интуитивно понятным интерфейсом, работает без каких-либо сбоев и обладает сопоставимой (относительно проприетарного ПО) вычислительной скоростью.
В акустической заглушенной камере Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа Центра акустических исследований ПНИПУ [69-73] был проведен эксперимент по локализации двух эталонных точечных источников (пьезоизлучателей), у которых известна частота шума излучения звука (2.4 и 2.7 кГц с небольшой погрешностью). В качестве средства проведения измерений использовалась 54-канальная микрофонной антенна Bruel & Kjaer. Антенна была направлена на источники звука и удалена от них на расстояние 4.2 м. Результаты эксперимента были обработаны в фирменном программном обеспечении «PULSE Array Acoustics Post-processing» в диапазоне частот до 6400 Гц. Карта распределения эталонных источников шума для частот 2408 и 2668 Гц показана на рисунке 8. Динамический диапазон представленных карт локализации 5 дБ.



Рисунок 8 – Результаты локализации точечных источников шума микрофонной антенной Bruel & Kjaer на частотах 2408 (слева) и 2668 (справа). Максимальные уровни звукового давления 49 дБ и 52 дБ соответственно

Далее те же самые данные звукового давления были обработаны с помощью собственного программного кода. Результаты работы алгоритма Conventional Beamforming показаны на рисунке 9, Cross-Spectral Beamforming на рисунке 10, алгоритма DAMAS на рисунке 11.



Рисунок 9 – Обработка экспериментальных данных алгоритмом Conventional Beamforming на частотах 2408 (слева) и 2668 (справа). Максимальные уровни звукового давления 49.3 дБ и 52.2 дБ соответственно



Рисунок 10 – Обработка экспериментальных данных алгоритмом Cross-Spectral Beamforming на частотах 2408 (слева) и 2668 (справа). Максимальные уровни звукового давления 49.3 дБ и 52.1 дБ соответственно



Рисунок 11 – Обработка экспериментальных данных алгоритмом DAMAS на частотах 2408 (слева) и 2668 (справа). Максимальные уровни звукового давления 47.3 дБ и 49.4 дБ соответственно

Наибольшее соответствие с результатами локализации, полученными фирменным программным обеспечением Bruel & Kjaer, показывает метод Cross-Spectral Beamforming. Как показали ранние исследования, В карте локализации классического алгоритма Conventional Beamforming (при сопоставимом динамическом диапазоне карты) ярко выражено присутствие боковых лепестков, обусловленных влиянием собственных шумов, создаваемых отдельными микрофонами. Локализация источников звука алгоритмом DAMAS в данном исследовании эффективна, однако существует различие в определяемых уровнях звукового давления.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования по локализации доминирующих источников шума, порождаемых турбулентной воздушной струей [71]. Измерения проводились для конического соплового насадка диаметром 40 мм, скорость струи в данном эксперименте составляла 0.3 М. Антенна была расположена параллельно оси струи и удалена от нее на 3.83 м. Карта распределения источников шума для частоты 3.5 кГц показана на рисунке 12. Результаты работы алгоритмов Conventional и Cross-Spectral

Beamforming показаны на рисунке 13, алгоритма DAMAS на рисунке 14. Динамический диапазон представленных карт локализации 5 дБ.



Рисунок 12 – Результаты локализации шума струи микрофонной антенной Bruel & Kjaer. Максимальный уровень звукового давления 27.6 дБ



Рисунок 13 – Обработка экспериментальных данных алгоритмами Conventional (слева) и Cross-Spectral Beamforming (справа). Максимальные уровни звукового давления 29.5 дБ и 27.7 дБ соответственно



Рисунок 14 – Обработка экспериментальных данных алгоритмом DAMAS. Максимальный уровень звукового давления 25.6 дБ

Наибольшее соответствие с результатами локализации, полученными фирменным программным обеспечением Bruel & Kjaer, показывает метод Cross-Spectral Beamforming. В карте локализации классического алгоритма Conventional Beamforming ярко выражено присутствие боковых лепестков, обусловленных влиянием собственных шумов, создаваемых отдельными например, оборудования для сбора (цифровых каналами, ОТ данных анализаторов).

Работа алгоритма DAMAS в данном исследовании удовлетворительна, что напрямую связано с относительно крупными размерами дискретной сетки, используемой при проведении обработки с помощью представленных методов. Авторы данного подхода в своей работе [32] указывают рекомендации по выбору размеров сетки, определяемых в зависимости от разрешающей способности используемой антенны, что можно выразить соотношением  $\Delta x/R_{Axis} \leq 0.2$ , где  $\Delta x$  – расстояние между элементами сетки,  $R_{Axis}$  – разрешающая способность (подробнее см. в разд. 3.2). Также количество сеточных элементов имеет значительное влияние на вычислительную скорость вследствие выполнения итеративного решения системы из линейных уравнений, равных по количеству

общему числу элементов сетки, что можно выразить в виде  $t = C(2J)^2 i$ , где t – время проведения вычислений, C – константа, определяемая мощностью вычислительного оборудования, J – общее число элементов сетки, i – номер итерации.

# 2.2. Создание программного обеспечения для визуализации результатов локализации звуковых источников в пространстве

Программное обеспечение для визуализации результатов локализации акустических источников было разработано в математическом пакете прикладных программ MathWorks MATLAB в интерактивном модуле для создания интерфейсом приложений с графическим **«MATLAB** Designer». App Разработанный программный продукт имеет интуитивно понятный пользовательский интерфейс, обладает поддержкой распознавания команд с клавиатуры (например, при исследовании спектральных характеристик сигнала), а также имеет большой выбор необходимых настроек и регулировок. Пример визуализации результатов локализации источников звука с помощью данного программного обеспечения представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Пример визуализации результатов локализации источников звука с помощью разработанного программного обеспечения

Интерфейс программного продукта построен на основе трех основных модулей: модуля представления и редактирования мета-данных, модуля настроек расчетных параметров и модуля визуализации. В левой части интерфейса располагается окно управления наборами локальных данных, иерархически выполненное в виде древовидной структуры, начиная с баз данных (Database). Каждая база может содержать в себе наборы временных сигналов (Time Data) для последующей пост-обработки. В свою очередь, каждый временной сигнал может содержать в себе требуемое количество расчетов (Calculation) с различными параметрами обработки. После проведения необходимых вычислений, каждую базу данных с соблюдением структуры всей иерархической ветки можно сохранить на локальный диск, а затем в любой момент загрузить в программное обеспечение и продолжить работу с того же места.

В модуле представления мета-данных пользователь может задавать каждому сигналу (или расчету) имя и номер сессии, дату проведения измерений, различные комментарии (например, об условиях оставлять проведения испытаний) и так далее. При выборе временных сигналов выводится информация об общем числе точек в файле записи; если сигналы были записаны с применением программного обеспечения Bruel & Kjaer PULSE и содержат в своей структуре заголовочные (Header) файлы, то дополнительно выводится информация о частоте дискретизации и полной длине анализируемого сигнала в Также в данном модуле содержится окно выбора фонового секундах. изображения с жесткого диска для последующей визуализации распределения звуковых сигналов на данном фоне.

В модуле расчетных параметров выполняется тонкая настройка последующей пост-обработки, в том числе: длины исследуемого сигнала в секундах (полная или пользовательская); типа частотного анализа (с постоянной или процентной шириной полосы пропускания для проведения узкополосного или октавного и дробно-октавного анализа соответственно); числа линий преобразования Фурье для расчета требуемой ширины полосы в Герцах; числа линейных усреднений; типа оконной функции; настройки частотного диапазона;

43

настройки параметров расчетной сетки; настройки координат расположения фонового изображения [100]. Реализована возможность выбора различных алгоритмов для пост-обработки звуковых сигналов (Conventional / Cross-Spectral Beamforming, DAMAS, CLEAN-PSF, CLEAN-SC). Также в данном модуле выполняется загрузка файла координат микрофонов в решетке, которая использовалась для записи исследуемых временных сигналов.

визуализации реализовано B модуле управление конечной картой локализации звуковых источников. Добавлена возможность перемещения и масштабирования карты, выбора прозрачности звуковых пятен для удобства восприятия источников в пространстве, выбора величины динамического диапазона. При наведении курсора мыши на точку дискретной сетки выводится информация об уровне звукового давления и координатах данной точки, а при нажатии производится построение частотного спектра в данной точке в исследуемом частотном диапазоне. Предусмотрена возможность анализа спектральных характеристик как на конкретной частоте, так и в заданном пользователем частотном диапазоне. Также реализовано построение общего частотного спектра (Total Spectrum), которой вычисляется на основе анализа всех карт локализации по всем имеющимся расчетным точкам во всём исследуемом частотном диапазоне; с помощью данного спектра в некоторых случаях возможно быстро определить частоту пика излучения доминирующего звукового источника, что значительно упрощает первичный анализ результатов карт локализации.

Работоспособность программного обеспечения тестировалась на наличие возможных сбоев и ошибок, вместе с этим параллельно выполнялась работа по оптимизации скорости проведения вычислений. В конечном итоге, можно заключить, что разработанный программный продукт обладает интуитивно понятным интерфейсом, работает без каких-либо сбоев и обладает сопоставимой с проприетарным программным обеспечением вычислительной скоростью.

44

## 2.3. Разработка и создание микрофонной антенны с возможностью перепозиционирования микрофонов для локализации источников звука

Разработка новой И проектирование универсальной конструкции микрофонной антенны [92, 101, 102], необходимой для проведения дальнейших исследований по оценке зависимости качества локализации источников шума от распределения акустических датчиков в антенне, было выполнено в системе анализа NX Unigraphics. К конструкции лучевой антенны инженерного предъявлялись следующие требования: возможность изменять число лучей, возможность точно регулировать лучи по углу, возможность изменять положение микрофонов по длине луча, возможность изменять число микрофонов в антенне, сопоставимая с фирменной антенной масса (до 10 кг в собранном состоянии) для легкой установки на стойку. Результаты компьютерного моделирования спроектированной конструкции представлены 16. антенны на рисунке Изготовленная и собранная микрофонная антенна представлена на рисунке 17.



Рисунок 16 – Компьютерная модель регулируемой лучевой микрофонной антенны



Рисунок 17 – Разработанная микрофонная антенна: 1 – центральное тело; 2 – диск с угловой разметкой; 3 – сухарь; 4 – луч; 5 – державка микрофона; 6 – хомут; 7 – веб-камера

Конструкция регулируемой антенны состоит из следующих элементов (рисунок 17): центральное тело; диск с угловой разметкой (2 шт.); сухарь (9 шт.); луч (9 шт.); державка микрофона (54 шт.); хомут (54 шт.).

Центральное тело представляет собой диск с отверстием, в которое запрессована втулка. В центр втулки устанавливается веб-камера, необходимая для создания фотографии исследуемой области пространства, на которую в дальнейшем будет накладываться карта распределения источников звука. На периферии диска имеются отверстия, в которые вкручиваются винты для поджатия к центральному телу диска с угловой разметкой; с её помощью становится возможным устанавливать сухари для крепления лучей антенны по угловой координате с точностью до 1°. Для обеспечения необходимой твердости при изготовлении зубьев, распределенных по внешней окружности, диски были изготовлены из стали, так как дюралюминий не подходил по технологическим причинам. Для снижения массы в металлических дисках были сделаны прорези. Для изготовления центрального тела из дюралюминия, вся центральная часть конструкции антенны была сделана составной.

Лучи антенны вставляются в сухари и поджимаются в основании винтами. Сами лучи сделаны из дюралюминиевых трубок и для жесткости внутри заполнены монтажной пеной. На торцы лучей надеты плоские заглушки. Для точного позиционирования микрофонов по радиальным координатам на каждый луч наклеена линейная шкала с шагом 1 мм (рисунок 18 (а)). Для обеспечения длительной сохранности шкалы снаружи на лучи надета термоусадочная пленка.

По лучу передвигаются державки, в которые вставляются микрофоны. Державки, как и другие элементы антенны, были спроектированы в системе инженерного анализа NX Unigraphics. Созданные 3D-модели державок были конвертированы в программное обеспечение 3D-принтера и напечатаны методом послойной укладки полимера FDM (сокр. от Fused Deposition Modeling) из ABS-пластика. Для более надежной посадки державки имеют изогнутое основание с радиусом, равным радиусу луча антенны, а также место под хомут. Металлический хомут с барашком для удобства эксплуатации притягивает державку к лучу в установленной позиции по радиальной координате (рисунок 18 (б)). Для точного позиционирования на основании державки имеется отметка, совпадающая с ее поперечной осью. Антенна крепится к раздвижной стойке через длинную втулку центрального тела. Изготовленная и собранная антенна представлена на рисунке 18 (в).

Вследствие того, что элементы разработанной микрофонной антенны изготовлены из алюминиевых сплавов, стальных конструкций и полимерных материалов, обеспечивается оптимальная масса всей сборки при установке на стойку, сопоставимая с массой антенны Bruel & Kjaer, в совокупности с необходимой жесткостью конструкции. Возможность изменения числа лучей и числа микрофонов на лучах, а также положения микрофонов с возможностью точного позиционирования по угловой (с шагом 1°) и по радиальной (с шагом

47

1 мм) координате выгодно отличают разработанную антенну от аналогичных продуктов мировых производителей.









Рисунок 18 – Конструктивные элементы разработанной микрофонной антенны: (а) – линейная шкала для регулирования положения микрофонов по радиальной координате; (б) – державки для установки микрофонов; (в) – микрофонная антенна, подготовленная к акустическим измерениям в заглушенной камере

#### Выводы по Главе 2

1. Оценочный анализ карт локализации, полученных с использованием 3-х общеизвестных методов пост-обработки (Conventional Beamforming, Cross-Spectral Beamforming, DAMAS), показывает высокий уровень соответствия реализованного алгоритма Cross-Spectral Beamforming с алгоритмом,

используемым в проприетарном программном обеспечении, как по определяемому уровню звукового давления, так и по визуальному соотношению областей распределения акустических источников в пространстве.

2. Обнуление автоспектральной диагонали в матрице взаимных спектров ведет к существенному снижению боковых лепестков формируемой карты локализации, что объясняется отсутствием когерентности между собственными шумами в различных каналах друг относительно друга. Иными словами, в идеальных условиях, взаимно-спектральные компоненты суммируются когерентно и не зависят от собственного шума, что впоследствии ведет к его подавлению в процессе усреднения.

3. Разработанное на платформе математического пакета MathWorks обеспечение MATLAB программное для проведения пост-обработки демонстрирует сопоставимый акустических сигналов С проприетарным программным продуктом «Bruel & Kjaer NSI Array Acoustic Post-Processing» 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.

4. Разработанная конструкция лучевой микрофонной антенны обладает возможностью выбора числа лучей и числа микрофонов на лучах, а также проведения точного позиционирования микрофонов по угловой и радиальной Конструкция изготовлена из металлических координате. И полимерных материалов, благодаря чему обеспечивается оптимальная масса при установке на стойку в совокупности с необходимой жесткостью. Данные особенности выгодно отличают разработанную антенну OT аналогичных продуктов мировых производителей, позволяя использовать ее в научных исследованиях по верификации новых алгоритмов настройки плоских микрофонных антенн с целью повышения качества локализации источников звука путем тестирования оптимального набора расположения микрофонов в экспериментальных условиях.

49

## ГЛАВА З. НАСТРОЙКА МИКРОФОННОЙ АНТЕННЫ НА ОПТИМАЛЬНОЕ КАЧЕСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗВУКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ МОНОПОЛЬНОГО ТИПА

После создания программной и аппаратной части измерительного комплекса, обладающего вариативностью настройки к требуемым условиям проведения и пост-обработки эксперимента, необходимо определить критерии, отвечающие за качество проведения акустических измерений, а затем, на основе их оценки, найти оптимальные параметры для пост-обработки и настройки микрофонной антенны, обеспечивающие качество локализации, не уступающее существующим мировым аналогам. На начальном этапе рассматриваются методы, основанные на монопольности искомых звуковых источников, для дальнейшего перехода к рассмотрению акустических диполей.

# 3.1. Алгоритмическая реализация методов пост-обработки для эффективной локализации звуковых источников монопольного типа

#### Алгоритм Conventional (Delay-and-Sum) Beamforming

1. Считывание акустических данных (давление-время). На первом этапе программой считываются файлы данных, содержащие записанные микрофонами в решетке акустические сигналы, в которых содержатся амплитуды звукового давления в Паскалях в зависимости от времени в секундах. При известном общем времени записи и частоте дискретизации вычисляется временной шаг.

2. Считывание пространственного распределения микрофонов в антенне. Далее в программу из отдельного файла загружаются координаты расположения микрофонов в антенне. В данном случае все микрофоны находятся в одной плоскости, следовательно, для расчета достаточно двух  $\{x; y\}$ -координат для каждого микрофона.

3. Задание пределов дискретной сетки, размера элементов и расстояния до источника по нормали. Необходимо задать пределы и размеры элементов

дискретной сетки в плоскости, содержащей предполагаемые акустические источники, которые определяются следующим образом. Сначала определяется расстояние *z*, которое измеряется по нормали от плоскости антенны до плоскости акустических источников. Диаметр круговой области *L*, охватываемой антенной с круговой апертурой на расстоянии *z*, определяется с учетом угла раскрытия микрофонной антенны (на практике угол раскрытия  $\theta$  как правило не превышает 30°, что подробнее описано в разд. 4.3) по соотношению  $L = 2 \cdot tg(\theta) \cdot z \approx 1.15z$  при  $\theta = 30^{\circ}$  [9]. Таким образом, пределы прямоугольной дискретной сетки не должны выходить за пределы области, охватываемой данной микрофонной антенной.

4. Задание числа точек на блок данных. С помощью частотного диапазона записи  $f_s$ , не превышающего значения половины частоты дискретизации согласно теореме Котельникова [103], и заданного числа линий быстрого преобразования Фурье  $N_L$ , определяется частотный шаг, равный  $\Delta f = f_s / N_L$ , на основе которого задается период для каждого блока данных, равный  $T = 1 / \Delta f$ . Вышеописанные параметры позволяют в конечном итоге получить число точек на один блок экспериментально полученных данных, определяемый как  $N_B = T / \Delta t$ .

5. Расчет числа усреднений. Для определения общего числа усреднений, выполняемых по всей длине сигнала, необходимо определить целое число блоков, равное  $N_S = N_A$  div  $N_B$ , где  $N_A$  – общее количество точек всего сигнала, div – математическая операция целочисленного деления.

6. Задание оконной функции и процентного перекрытия. Каждый блок экспериментально полученных данных умножается на периодическую оконную функцию Хеннинга, после чего выполняется процедура быстрого преобразования Фурье. Следует отметить, что к процедуре последовательности выбора блоков данных можно применить процентное перекрытие. Затем проводится нормировка полученных спектральных составляющих по амплитудам, после чего из каждого спектрального отсчета, применительно ко всем микрофонам в решетке, формируется набор матриц взаимных спектров **С**, согласованных с каждой конкретной частотой  $\omega$ . Согласно выражению (1), каждая такая матрица вычисляется в виде:

$$\mathbf{C}(\omega) = \begin{bmatrix} C_{11}(\omega) & C_{12}(\omega) & \cdots & C_{1N}(\omega) \\ C_{21}(\omega) & C_{22}(\omega) & \cdots & C_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N1}(\omega) & C_{N2}(\omega) & \cdots & C_{NN}(\omega) \end{bmatrix}$$

где *N* – общее число микрофонов в антенне,  $\omega$  – круговая частота, определенная в диапазоне  $\omega = 0, \Delta f, \dots, 2\pi (f_S - \Delta f)$ . Взаимно-спектральные элементы матрицы задаются в виде  $C_{nm}(\omega) = P_n(\omega) P_m^*(\omega)$ .

7. Усреднение матриц взаимных спектров. После процедуры цифровой обработки всех блоков данных, находящихся в исходной записи, проводится усреднение всего набора матриц взаимных спектров **C**, относящихся к одним и тем же спектральным отсчетам на каждом блоке, путем их суммирования и деления на общее число блоков  $N_s$ :

$$\hat{\mathbf{C}}_{\omega} = \frac{1}{N_S} \sum_{s=1}^{N_S} [\mathbf{C}(\omega)]_s \,.$$

Теперь для формирования оценочной мощности сигналов имеется набор матриц взаимных спектров, сопоставленных с конкретной частотной полосой.

8. *Формирование направляющих векторов*. Для каждой круговой частоты *ω* из представляющего интерес диапазона формируется набор направляющих векторов, определяющих связь между положением каждого микрофона в решетке с каждой точкой дискретной сетки:

$$\hat{\mathbf{g}}_{j\omega} = \mathbf{g}(\omega, \vec{r}_{nj}) = \begin{bmatrix} g_1(\omega, \vec{r}_{1j}) \\ g_2(\omega, \vec{r}_{2j}) \\ \vdots \\ g_N(\omega, \vec{r}_{Nj}) \end{bmatrix}$$
при  $n = 1...N$ ,  $j = 1...J$ .

Модуль вектора, определяющего дистанцию между положениями микрофонов в решетке и точками дискретной сетки для каждого элемента направляющего вектора, выражается в виде:

$$\left|\vec{r}_{nj}\right| = \sqrt{(x_n - x_j)^2 + (y_n - y_j)^2 + (z_n - z_j)^2}$$

Здесь  $x_n$ ,  $y_n$   $u z_n$  – проекции координат микрофонов на плоскости  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  соответственно;  $x_j$  и  $y_j$  – координаты точек дискретной сетки в плоскости  $X_jY_j$ ;  $z_j$  – расстояние от микрофонной антенны до плоскости  $X_jY_j$ , определяемой для оценки амплитуд предполагаемых звуковых источников.

9. Вычисление оценочной мощности сигналов. Для вычисления квадратичного значения амплитуд давления  $a^2(\omega, \vec{r}) = \vec{A}$  проводится оценка амплитуд звуковых источников в каждой точке виртуальной сетки. Число наборов данных амплитуд соответствует количеству рассматриваемых частот. В соответствии с основным уравнением Conventional Beamforming (2), описанном в разд. 1.3, получаем:

$$a_{j\omega}^{2} = \frac{\hat{\mathbf{g}}_{j\omega}^{*} \hat{\mathbf{C}}_{\omega} \hat{\mathbf{g}}_{j\omega}}{\left\| \hat{\mathbf{g}}_{j\omega} \right\|^{4}}$$

В результате проведения вычислений формируется матрица с размерностью  $[J \times (N_L + 1)]$ , которая содержит в себе все оценки мощностей сигналов в каждой точке сетки и в каждой (из задаваемого диапазона) частотной полосе. В последующем каждый вектор-столбец перестраивается в двумерный массив, элементы которого соответствуют значениям мощностей, связанных с каждой конкретной точкой виртуальной сетки в карте визуализации, для полосы, соответствующей частоте  $f = (i - 1)\Delta f$ , где i – индекс столбца исходной матрицы.

10. Конвертация амплитуд в УЗД и построение карты локализации. После проведения всех вышеописанных манипуляций, оценочная мощность сигналов  $a_{j\omega}^2 = \overline{A}_{j\omega}$  преобразуется в уровень звукового давления (Sound Pressure Level, сокр. SPL) и наносится на карту локализации:

$$SPL_{j\omega} = 10 \cdot \lg \left(\overline{A}_{j\omega} / p_0^2\right)$$

Здесь  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  – опорное звуковое давление в Паскалях, соответствующее порогу слышимости синусоидальной звуковой волны с частотой 1 кГц.

#### Алгоритм Cross-Spectral Beamforming

Перед проведением пост-обработки с помощью алгоритма Conventional Beamforming следует отметить, что автоспектральные элементы С<sub>nm</sub> в матрице взаимных спектров могут содержать собственный шум отдельных каналов [104], например, электронный шум от оборудования для сбора данных (цифровых анализаторов). По этой причине необходимо найти способ его исключить. В идеальном случае, кросс-спектральные элементы  $C_{nm}$  при  $m \neq n$  не зависят от собственного шума, поскольку собственный шум в одном канале, как правило, некогерентен с собственным шумом в любом другом канале. При этом условии усреднение будет подавлять вклады от собственного шума в кросс-спектральных элементах матрицы взаимных спектров. Таким образом, применяется обнуление всех автоспектральных элементов матрицы взаимных спектров, а при расчете оценочной мощности сигнала необходима коррекция суммы произведения квадратичных элементов направляющих векторов, исключающая значения комбинаций автоспектральных элементов. Данный метод получил название Cross-Spectral Beamforming. Для описания его алгоритма можно воспользоваться алгоритмом классического бимформинга с некоторыми замечаниями:

– в пункте 7 предыдущего раздела необходимо обнулить главные диагонали всех матриц взаимных спектров, относящихся к конкретным частотным полосам;

– в пункте 9 предыдущего раздела необходимо использовать модифицированное значение суммы произведений квадратичных элементов направляющих векторов, исключающее комбинации, формирующие автоспектральные элементы. Следовательно, формула (3) запишется в виде:

$$\widetilde{a}_{j\omega}^{2} = \frac{\widehat{\mathbf{g}}_{j\omega}^{*} \overline{\mathbf{C}}_{\omega} \widehat{\mathbf{g}}_{j\omega}}{\sum_{(m,n)\in S, m\neq n} \left| g_{n}(\omega, \vec{r}_{nj}) \right|^{2} \left| g_{m}(\omega, \vec{r}_{mj}) \right|^{2}},$$

где *m*, *n* – текущие индексы микрофонов, *S* – подмножество всех возможных (m, n)-комбинаций;  $\overline{\mathbf{C}}_{\omega}$  – квадратная матрица взаимных спектров с размерностью  $[N \times N]$  с обнуленной главной диагональю, содержащая в себе все комбинации

акустических сигналов  $C_{mn}$  ( $m \neq n$ ) в частотной области на определенной круговой частоте  $\omega$ .

#### Алгоритм DAMAS

Метод DAMAS (сокр. от The Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources) представляет собой итеративный неотрицательный решатель линейной системы уравнений методом наименьших квадратов. В основе метода лежит предположение о том, что карта локализации звуковых источников в плоскости наблюдения может быть аппроксимирована сверткой распределения фактических источников звука с функцией рассеяния точки (Point Spread Function, или сокр. PSF), определяющей импульсный отклик микрофонной решетки на точечный источник. PSF имеет прямую зависимость от геометрических параметров решетки, а также от частоты локализуемого источника. С помощью операции деконволюции (обратной свертки) акустических сигналов с PSF возможно достичь увеличения разрешения исходной карты локализации за счет существенного снижения боковых лепестков, что позволяет увеличить предел пространственного Conventional разрешения классического алгоритма Beamforming, после работы которого набор оценочных мощностей сигналов используется в DAMAS в качестве входного параметра.

1. Формирование входных данных для расчета. В основе работы данного алгоритма лежит классический итерационный метод решения системы линейных уравнений Гаусса-Зейделя. Поэтому исходные данные формируются в матричной форме в виде квадратной матрицы системы **A**, содержащей квадраты модулей произведений направляющих векторов  $|\mathbf{g}_{j}^*\mathbf{g}_{j'}^{-1}|^2$ , и вектора-столбца свободных членов **B**, который включает в себя оценочные мощности сигналов для каждой точки дискретной сетки, полученные после окончания работы метода Сonventional Beamforming. Таким образом:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left| \mathbf{g}_{1}^{*} \mathbf{g}_{1}^{-1} \right|^{2} & \cdots & \left| \mathbf{g}_{1}^{*} \mathbf{g}_{J}^{-1} \right|^{2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left| \mathbf{g}_{J}^{*} \mathbf{g}_{1}^{-1} \right|^{2} & \cdots & \left| \mathbf{g}_{J}^{*} \mathbf{g}_{J}^{-1} \right|^{2} \end{bmatrix}, \ \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \left| \overline{q}_{1} \right| \\ \vdots \\ \left| \overline{q}_{J} \right| \end{bmatrix}, \ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \left| \overline{A}_{1} \right| \\ \vdots \\ \left| \overline{A}_{J} \right| \end{bmatrix}.$$

2. Решение системы уравнений. Решение системы сводится к матричному уравнению вида  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$ . Решение выполняется итеративно. При каждой последующей итерации все отрицательные приближения приравниваются к нулю. Для удобства описания итерационного процесса выполняется замена:  $|\mathbf{g}_{j}^{*}\mathbf{g}_{j'}^{-1}|^{2} = \widetilde{G}_{j,j'}; |\overline{q}_{j}| = \hat{Q}_{j}; |\overline{A}_{j}| = \hat{A}_{j}$ . Тогда:

$$\hat{Q}_{j}^{(i)} = \max\left(0, \hat{A}_{j} - \left[\sum_{j=1}^{j-1} \tilde{G}_{j,j'} \hat{Q}_{j'}^{(i)} + \sum_{j=j+1}^{J} \tilde{G}_{j,j'} \hat{Q}_{j'}^{(i-1)}\right]\right).$$

Здесь верхний индекс (*i*) обозначает номер итерации.

После проведения всех вышеописанных вычислений, как и в случае традиционных методов пост-обработки, полученные оценочные мощности сигналов  $\hat{Q}_{j\omega}$  конвертируются в уровни звукового давления и наносятся на карту локализации.

# 3.2. Реализация математической модели для проведения настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации звуковых источников монопольного типа

Математическая модель для проведения настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации монополей была разработана и описана специалистами компании Bruel & Kjaer в 2004 году [9]. Основной идеей данной модели является нахождение целевой функции, описывающей диаграмму направленности в заданном пространстве проекций волновых векторов, зависящей только от одного параметра – вектора, содержащего в себе координаты расположения всех микрофонов в антенне. Таким образом, путем выполнения всего лишь одного расчета, становится возможным получить сразу всю карту распределения боковых лепестков в интересующем диапазоне частот, которая будет соответствовать конкретной микрофонной антенне с конкретным расположением измерительных датчиков. Применяя различные методы оптимизации и различные начальные условия выполнения расчета, можно получить конфигурацию антенны, обладающую высокой эффективностью локализации для выполнения конкретной экспериментальной задачи.

Математически метод настройки антенны выражается исходя из уравнений, описывающих метод Conventional Beamforming, но при удалении антенны на бесконечное расстояние от акустического источника. Для начала определяется вектор  $\mathbf{P}_{meas}$ , содержащий звуковые давления  $P_{n,meas}(\omega)$  в частотной области, где n – индекс микрофона. Далее формируется модельный вектор звуковых давлений, содержащий в себе неизвестную амплитуду  $P_0(\omega)$ , подлежащую дальнейшей оценке:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{mod}} = P_0(\omega)\mathbf{g},$$

где **g** – направляющий вектор, содержащий в себе передаточные функции  $g_n(\omega)$ для всех микрофонов (n = 1...N), связывающие между собой координаты точечной сетки и позиции микрофонов в антенне на представляющих интерес частотах с определенной временной задержкой. Функция  $g_n(\omega)$  выражается в виде:

$$g_n(\omega) = e^{-i\omega\Delta t_n} / \vec{r}_n,$$

где  $\Delta t_e$  – временная задержка излучения сигнала,  $r_n$  – вектор, определяющий расстояние между микрофоном и конкретной точкой дискретной сетки.

Амплитуда  $P_0(\omega)$  оценивается путем минимизации разности между  $\mathbf{P}_{mod}$  и  $\mathbf{P}_{meas}$ , что легко можно выполнить методом наименьших квадратов:

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

в результате решения получаем:

$$\hat{P}_0(\omega) = \frac{\mathbf{g}^* \mathbf{P}_{meas}}{\mathbf{g}^* \mathbf{g}}.$$
(4)

Путем оценки амплитуд потенциальных источников в каждой точке дискретной сетки, формируется конечная карта локализации.

Для функции, формирующей определения целевой диаграмму направленности, вводится допущение, что микрофонная антенна располагается в дальнем поле; следовательно, расстояние между антенной и акустическим представления источником достаточно велико для ЗВУКОВЫХ сигналов, достигающих микрофонов, в качестве плоских волн. Исходя из этого, интерес представляет только направление падения звуковых волн. Тогда регистрируемое микрофонами звуковое давление можно записать в виде:

$$p(\vec{x}_n) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_n}$$

где  $\vec{k}$  – волновой вектор, который должен удовлетворять условию:

$$\frac{\omega^2}{c^2} = -\vec{k} \cdot \vec{k} = 0, \qquad (5)$$

где c – скорость звука. Рассматривая источник с единичной амплитудой и волновым вектором  $\vec{k}_0$ , давление, регистрируемое микрофонами в антенне, равно:

$$\mathbf{P}_{meas} = \begin{bmatrix} e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_1} \\ \vdots \\ e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_N} \end{bmatrix}$$

Направляющий вектор, определяющий связь между антенной и точкой сетки в направлении волнового вектора  $\vec{k_1}$ , равен:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} \\ \vdots \\ e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_N} \end{bmatrix}$$

где  $\vec{k}_0$  и  $\vec{k}_1$  удовлетворяют условию (5), т.е. соответствуют одной и той же частоте. В итоге можно записать:

$$\mathbf{g}^{*}\mathbf{P}_{meas} = \left(e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{1}}e^{i\vec{k}_{0}\cdot\vec{r}_{1}} + \dots + e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{N}}e^{i\vec{k}_{0}\cdot\vec{r}_{N}}\right),\\ \mathbf{g}^{*}\mathbf{g} = \left(e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{1}}e^{i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{1}} + \dots + e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{N}}e^{i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{N}}\right) = N.$$

Следовательно, уравнение (4) можно переписать в виде:

$$\hat{P}_{0}(\omega) = \frac{\mathbf{g}^{*}\mathbf{P}_{meas}}{\mathbf{g}^{*}\mathbf{g}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} e^{-i\left(\vec{k}_{1} - \vec{k}_{0}\right)\cdot\vec{r}_{n}} = W\left(\vec{k}_{1} - \vec{k}_{0}\right) = W\left(\vec{K}\right), \tag{6}$$

где  $W(\vec{K})$  – апертурная сглаживающая функция (Aperture Smoothing Function). Функция  $W(\vec{K})$  содержит в себе все представляющие интерес направления для сканирования падающих на антенну плоских волн; для эффективной минимизации боковых лепестков, область сканирования должна включать все интересующие направления, но исключать область расположения основного лепестка. В идеальном случае, для полного исключения боковых лепестков, данная функция должна удовлетворять условию:

$$W(\vec{K}) = \begin{cases} 1, \ ecnu \ \vec{k}_1 = \vec{k}_0 \\ 0, \ ecnu \ \vec{k}_1 \neq \vec{k}_0 \end{cases}$$

однако, при использовании конечного числа микрофонов *N*, выполнение данного условия становится невозможным.

Поскольку вектор  $r_n$ , определяющий расстояние между микрофоном и точкой сетки, имеет координату z = 0, диаграмма направленности будет независима от проекции волнового вектора  $k_z$ . Следовательно, можно записать:

$$(\vec{k}_1 - \vec{k}_0) \cdot \vec{r}_n = (k_{1,x} - k_{0,x}) x_n + (k_{1,y} - k_{0,y}) y_n,$$

для апертурной функции (6):

$$W(k_{1,x},k_{1,y}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} e^{-i[(k_{1,x}-k_{0,x})x_n + (k_{1,y}-k_{0,y})y_n]}.$$

Исходя из анализа данных уравнений следует, что результаты локализации звукового источника инвариантны к сдвигу по отношению к проекциям волнового вектора  $k_{1,x}$  и  $k_{1,y}$ . Иными словами, падающая плоская волна с проекциями  $k_{1,x} = k_{0,x}$  и  $k_{1,y} = k_{0,y}$  дает аналогичные результаты, что и в случае  $k_{1,x} = 0$  и  $k_{1,y} = 0$ , но с применением сдвига на  $(k_{1,x}, k_{1,y}) = (k_{0,x}, k_{0,y})$ . Следовательно, функцию (6) можно записать:

$$W(k_x,k_y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} e^{-i(k_x x_n + k_y y_n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} e^{-i\vec{K} \cdot \vec{r}_n} .$$

Диаграмма направленности, построенная для 54-канальной микрофонной антенны Bruel & Kjaer на основе вычисления апертурной сглаживающей функции в плоскости *XY*, показана на рисунке 19.



Рисунок 19 – Диаграмма направленности, сформированная для микрофонной антенны Bruel & Kjaer. Динамический диапазон 20 дБ

Далее формируется радиальный профиль диаграммы направленности, который можно определить по формуле:

$$W_{p}(K) \equiv 10 \cdot \log_{10} \left[ \max_{|\vec{K}| = K} \left| W(\vec{K})^{2} \right| N^{2} \right],$$
(7)

где  $K = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ . С его помощью можно определить функцию максимального уровня боковых лепестков:

$$MSL(K) = \max_{K_{\min}^{0} \leq K' \leq K_{\max}} W_{p}(K') \equiv 10 \cdot \log_{10} \left[ \max_{K_{\min}^{0} \leq |\vec{K}| \leq K_{\max}} |W(\vec{K})|^{2} / N^{2} \right],$$
(8)

где  $K_{\min}^0 = 1.22 \frac{2\pi}{D}$  – первый минимум функции диаграммы направленности, соответствующий круговой апертуре с диаметром *D*. Чтобы перейти от абсолютной величины разности проекций волновых векторов к частотам, можно

воспользоваться выражением  $|\vec{K}| \le 2k = 2\omega/c = 4\pi f/c$  и построить функцию уровня боковых лепестков в зависимости от частоты излучения источника. Путем минимизации целевой функции (8) можно добиться низких максимальных уровней боковых лепестков в диаграмме направленности, что напрямую влияет на качество локализации звуковых источников с помощью оптимально настроенной микрофонной антенны [11]. Функция максимального уровня боковых лепестков, сформированная для антенны Bruel & Kjaer, показана на рисунке 20.



Рисунок 20 – Функция максимального уровня боковых лепестков, построенная для 54-канальной микрофонной антенны Bruel & Kjaer

После нахождения расположения микрофонов в антенне, обеспечивающего максимальный динамический диапазон, можно оценить разрешающую способность антенны, напрямую влияющую на качество локализации звуковых источников. Величина, характеризующая разрешающую способность антенны при падении на нее плоских волн в осевом направлении (при параллельности нормали волнового фронта с нормалью плоскости установки микрофонов, т.е. при угле отклонения нормалей  $\theta = 0^{\circ}$  относительно друг друга), представляет собой минимально возможное расстояние, при котором два звуковых источника

возможно однозначно разделить между собой на карте визуализации. В общем виде данное выражение задается как:

$$R(\theta) = \frac{\alpha}{\cos^3(\theta)} \frac{z}{D} \lambda, \qquad (9)$$

следовательно, при падении на антенну волн в осевом направлении:

$$R_{Axis} = R(0) = \alpha \frac{z}{D} \lambda, \qquad (10)$$

где  $\alpha = 1.22$  – коэффициент, определяемый для круговой апертуры антенны (по аналогии с критерием Рэлея для оптического разрешения [105]), *z* – расстояние от микрофонной антенны до плоскости, в которой находятся предполагаемые звуковые источники, представляющие интерес, *D* – максимальный диаметр микрофонной антенны с круговой апертурой,  $\lambda$  – длина волны. Таким образом, величина разрешающей способности (9), при прочих равных условиях падения на антенну плоских волн (одинаковой длине падающих волн и расстояния до плоскости сканирования), будет зависеть только от диаметра антенны.

### 3.3. Настройка микрофонной антенны на оптимальное качество локализации звуковых источников монопольного типа

При проектировании настраиваемой микрофонной антенны в качестве аналога от мирового производителя была выбрана 9-лучевая 54-канальная микрофонная антенна фирмы Bruel & Kjaer Type WA-1676-W-003 (Дания) (рисунок 21), имеющаяся в Центре акустических исследований ПНИПУ. Данный выбор был сделан с целью проведения последующего сравнительного анализа результатов, полученных с помощью фирменной антенны, с результатами, полученными с применением разработанного инструментария. Для проведения чувствительности разрешающей дополнительного анализа способности в параметров апертуры, максимальный диаметр зависимости от изменения настраиваемой антенны был увеличен до 3 м (против 2.5 м в антенне Bruel & Kjaer). Диаметр центральной области для крепления лучей и установки веб-камеры был выбран равным 0.3 м.

При расчетах задавалось 100 тыс. случайных начальных распределений микрофонов на всех 9 лучах, после чего в результате работы программного кода определялось максимальное значение динамического диапазона. В качестве граничной частоты диапазона оптимизации был установлен предел 1500 Гц. Данная частота была выбрана исходя из рассмотрения диаграммы направленности антенны Bruel & Kjaer (см. рисунок 20), в которой на данной частоте явно прослеживается резкий ступенчатый рост целевой функции.



Рисунок 21 – 9-лучевая 54-канальная микрофонная антенна Bruel & Kjaer (слева) и соответствующая ей схема установки микрофонов (справа)

Данный вывод косвенно подтверждается 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. На основе учета этой особенности было сделано предположение, что частота 1500 Гц является границей оптимизируемой области. Затем было проведено дополнительное исследование: в качестве граничной частоты оптимизации были использованы все частоты, на которых также проявляются характерные ступенчатые всплески целевой функции в

исходной диаграмме направленности (250, 1000, 4700, 5900 Гц). Однако оптимальные значения динамического диапазона в совокупности с оптимальной скоростью вычислений были получены именно на частоте 1500 Гц.

Для получения предпочтительных результатов в данной задаче были введены дополнительные ограничения, связанные со значениями расчетного динамического диапазона при выполнении каждой полной итерации. Например, результат не сохранялся для дальнейшего анализа (отбраковывался), если в оптимизируемой полосе частот (до 1500 Гц) значение динамического диапазона составляло менее 12 дБ. Также ограничения были наложены на среднюю и высокую полосу частот (1500-8000 Гц), в которой динамический диапазон должен составлять не менее 8 дБ. Выбор данных параметров определялся по аналогии с микрофонной антенной Bruel & Kjaer для получения близких (не отличающихся более чем на 1.5 дБ в меньшую сторону) значений динамического диапазона.

Для получения наиболее достоверных карт локализации источников звука в плоскости наблюдения, важно обеспечить максимально достижимый динамический диапазон во всей полосе частот (до 8000 Гц), в то время как граничная частота в задаче оптимизации была установлена в определенных пределах (до 1500 Гц). Иными словами, даже при достижении предпочтительных результатов в оптимизируемой полосе частот, высока вероятность получить неприменимые к дальнейшему анализу значения в полосе, не охватываемой оптимизатором. Таким образом, возникает необходимость применения ручной регулировки расчетных значений динамического диапазона в области, выходящей за пределы оптимизации.

Полученное в результате решения оптимизационной задачи распределение микрофонов (с учетом указанных выше ограничений) представлено на рисунке 22. Сравнение функций максимального уровня боковых лепестков (8) оптимально настроенной антенны и фирменной антенны Bruel & Kjaer показано на рисунке 23. Установлено, что динамический диапазон оптимизированной схемы установки микрофонов в полосе частот до 8000 Гц составляет 8.1 дБ (для

сравнения: у микрофонной антенны Bruel & Kjaer в соответствующей полосе частот динамический диапазон составляет 7.4 дБ при меньшем диаметре 2.5 м).



Рисунок 22 – Оптимизированная схема установки микрофонов в антенну



Рисунок 23 – Сравнение функций максимального уровня боковых лепестков

На следующем этапе определялось качество локализации виртуальных звуковых источников с помощью настроенной микрофонной антенны и антенны

Вruel & Kjaer. Генерировалось 3 некоррелированных монопольных точечных источника с частотой излучения 0.5, 1 и 2 кГц с уровнем звукового давления 100 дБ. Источники располагались в точках  $\{x, y\} = \{0; 1\}, \{-1; -1\}, \{1; -1\}$  м. Расстояние по нормали от антенны до плоскости наблюдения составляло 3 м. Локализация выполнялась с помощью методов пост-обработки, описанных в предыдущих разделах. Карты, полученные методом Cross-Spectral Beamforming, представлены на рисунках 24-26. Динамический диапазон карт 5 дБ.



Рисунок 24 – Карты локализации виртуальных источников с частотой 500 Гц: (а) – настроенная антенна; (б) – антенна Bruel & Kjaer



Рисунок 25 – Карты локализации виртуальных источников с частотой 1000 Гц: (а) – настроенная антенна; (б) – антенна Bruel & Kjaer



Рисунок 26 – Карты локализации виртуальных источников с частотой 2000 Гц: (а) – настроенная антенна; (б) – антенна Bruel & Kjaer

Исходя из визуального сопоставления представленных карт локализации, можно предварительно заключить, что антенна, настроенная С учетом монопольной оптимальной установки микрофонов, обладает схемы эквивалентным с коммерческой антенной качеством локализации точечных некогерентных монополей. Увеличение диаметра новой антенны с 2.5 до 3 м влечет за собой рост ее круговой апертуры, сужающей ширину главного лепестка и, как следствие, смещающей ближе к лепестку (по радиальной координате) точку первого минимума апертурной сглаживающей функции, определяющей нижнюю границу диапазона при построении функции максимального уровня боковых лепестков, что, как было показано ранее, благоприятно влияет на величину разрешающей способности антенны. Данный факт визуально подтверждается наблюдением более компактной области распределения теоретического местонахождения источника (пятен локализации меньшей площади), что, в конечном итоге, дает преимущество в идентификации близкорасположенных источников звука с помощью антенны с проведенной настройкой. Для полной и достоверной оценки эффективности и работоспособности реализованного метода настройки необходимо провести серию экспериментальных исследований в лабораторных условиях с применением разработанной микрофонной антенны.

67

## 3.4. Экспериментальные исследования локализации источников шума монопольного типа в акустической заглушенной камере с помощью настроенной микрофонной антенны

Исследования локализации шума ПО источников проводились В аттестованной акустической заглушенной камере Центра акустических исследований ПНИПУ, характеристики которой подробнее представлены в [69-73]. Запись временных работах всех реализаций проводилась c использованием микрофонов поля давления Bruel & Kjaer 4944-W-003, подключенных к пяти аналого-цифровым модулям ввода Bruel & Kjaer LAN-XI-3050-А-060, сигналы с которых поступали через LAN-соединение в персональный компьютер с программным обеспечением Bruel & Kjaer PULSE, где в конечном итоге записывались в файлы в виде сигналов акустического давления во временной области. Перед проведением измерений проводилась процедура калибровки всех микрофонов с помощью пистонфона Bruel & Kjaer 4228, также фиксировались основные параметры окружающей среды: температура, влажность, атмосферное давление.

Измерения выполнялись с помощью двух описанных в предыдущем разделе микрофонных антенн: коммерческой Bruel & Kjaer и разработанной микрофонной антенной с оптимальной монопольной настройкой (см. раздел 2.3). На рисунке 27 представлены результаты локализации эталонных стационарных источников звука. Частоты генерации звука пьезоизлучателями определены с высокой точностью, центр пятен локализации совпадает с их реальным положением. В целом по результатам измерений точечных источников шума можно сделать вывод, что микрофонная антенна с оптимальной монопольной настройкой за счет сопоставимого с фирменной антенной динамического диапазона и повышенной разрешающей способности показывает более качественные результаты, чем антенна Bruel & Kjaer. Размеры пятен звуковых источников на карте локализации визуально меньше по сравнению с представленными на рисунке 10, что свидетельствует о высокой эффективности реализованного метода оптимальной монопольной настройки антенны. Уровни звукового давления определяемых

источников звука в обоих случаях сопоставимы и различаются не более, чем на 3 дБ.





(б)

Рисунок 27 – Результаты локализации точечных источников звука (пьезоизлучателей) разработанной микрофонной антенной с оптимальной монопольной настройкой с частотами излучения 2408 Гц (а) и 2668 Гц (б)

Также помощью обеих микрофонных проведены с антенн были исследования по локализации источников шума, порождаемых воздушной турбулентной струей, для различных форм сопловых насадков (для создания различных начальных условий истечения струи). Как и в предыдущем случае, исследования проводились в аттестованной акустической заглушенной камере. При проведении измерений использовались сопловые насадки конической и шевронной формы, фотографии которых представлены на рисунке 28. Более подробное описание характеристик данных сопел представлены в работах [101, 106-108].



Рисунок 28 – Конический (слева) и шевронный (справа) сопловые насадки, установленные на струйной установке

Измерения коммерческой микрофонной выполнялись антенной Bruel & Kjaer микрофонной разработанной антенной И С монопольной настройкой. Для сопоставления результатов локализации источников шума, полученных антеннами, обеспечивались разными одинаковые условия проведении экспериментов. Предварительно были выполнены измерения скорости воздушной струи трубкой Пито-Прандтля, после чего она была убрана, и на соответствующих режимах работы струйной установки был измерен шум воздушной струи, истекающей из конических и шевронных сопловых насадков.

Записанные антенной Bruel & Kjaer временные реализации сигналов были обработаны в фирменном ПО Bruel & Kjaer NSI Array Acoustic Post-Processing с помощью вшитого алгоритма Cross-Spectral Beamforming (как было установлено ранее в разделе 2.1). Временные реализации шума, записанные новой антенной, были обработаны в созданном программном обеспечении с помощью того же алгоритма. Общий вид подготовленных для измерений антенн представлен на рисунке 29. Некоторые примеры полученных результатов представлены на рисунках 30 и 31. Динамический диапазон карт локализации составляет 6 дБ.



(a)



(б)

- Рисунок 29 Общий вид подготовленных для измерений микрофонных антенн в заглушенной камере: (а) микрофонная антенна Bruel & Kjaer;
  - (б) разработанная микрофонная антенна с оптимальной монопольной

настройкой





250 Гц





500 Гц





1000 Гц





2000 Гц


4000 Гп





8000 Гц

Рисунок 30 – Результаты локализации шума чистой струи, истекающей из конического сопла диаметром 40 мм при скорости потока 0.55М, полученные антенной Bruel & Kjaer (слева) и разработанной антенной и ПО (справа)

По результатам сравнительного анализа измерений шума турбулентной воздушной струи можно заключить, что разработанная микрофонная антенна с оптимальной монопольной настройкой В комбинации с разработанным программным обеспечением для пост-обработки результатов измерений и построения карт локализации дают результаты лучшие, чем коммерческая микрофонная программное обеспечение обработки фирмы антенна И Bruel & Kjaer. Это выражается в более компактной области локализации звуковых источников на карте локализации, особенно на низких частотах. На высоких частотах (рисунки 30 и 31, частота 8000 Гц), в тех случаях, когда уровень паразитного шума сопоставим с уровнем излучения основного источника шума, настроенная антенна дает менее зашумленную карту локализации.





250 Гц







500 Гц



1000 Гц





74

2000 Гц





4000 Гц





8000 Гц

Рисунок 31 – Результаты локализации шума чистой струи, истекающей из шевронного сопла диаметром 40 мм при скорости потока 0.55М, полученные антенной Bruel & Kjaer (слева) и разработанной антенной и ПО (справа)

На основе анализа представленных результатов можно заключить, что они хорошо соответствуют известным представлениям о физике процессов генерации шума турбулентными струями:

– более высокочастотные источники генерируются менее масштабными турбулентными структурами, находящимися ближе к кромке сопла, что подтверждается локализацией высокочастотных источников шума также ближе к кромке сопла [101, 109];

– шевронные сопла «разрыхляют» начальный участок струи, делая его менее коротким и способствуя тем самым более быстрому смещению источников шума к кромке сопла, что видно при сравнении карт локализации для конического и шевронного сопловых насадков на одинаковых частотах.

Кроме того, видно, что положения источников шума, полученные с помощью разработанной антенны, точно совпадают с положениями источников, полученными с помощью фирменной антенны Bruel & Kjaer. Небольшие отличия в уровнях звукового давления обусловлены погрешностью позиционирования микрофонов в разработанной антенне.

#### Выводы по Главе 3

1. Применение апертурной сглаживающей функции с последующей ее трансформацией в диаграмму направленности позволяет выполнять построение контурного графика частотно-зависимого размещения боковых лепестков (относительно главного) 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.

2. Виртуальный эксперимент по локализации модельных точеных монопольных источников, заданных аналитически, показал, ЧТО антенна, настроенная с учетом монопольной оптимальной схемы установки микрофонов, обладает эквивалентным с коммерческой антенной качеством локализации точечных некогерентных монополей. Увеличение диаметра антенны с 2.5 до 3 м влечет за собой рост ее круговой апертуры, сужающей ширину главного лепестка, что благоприятно влияет на величину ее разрешающей способности. Данный факт визуально подтверждается наблюдением пятен локализации меньшей площади, что дает преимущество в идентификации близкорасположенных источников звука с помощью антенны с проведенной настройкой.

3. Экспериментальные исследования локализации монополей В акустической заглушенной камере показали, что разработанная антенна с монопольной настройкой В комбинации оптимальной с разработанным программным обеспечением для пост-обработки дают результаты лучшие, чем коммерческая антенна и программное обеспечение Bruel & Kjaer, что выражается в более компактной области локализации звуковых источников на карте, особенно на низких частотах. На высоких частотах, когда уровень паразитного шума сопоставим с уровнем излучения основного источника, настроенная антенна дает менее зашумленную карту. Небольшие отличия в определяемых уровнях обусловлены погрешностью позиционирования микрофонов В разработанной антенне.

# ГЛАВА 4. НАСТРОЙКА МИКРОФОННОЙ АНТЕННЫ НА ОПТИМАЛЬНОЕ КАЧЕСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗВУКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ДИПОЛЬНОГО ТИПА

В заключительной части работы необходимо разработать и валидировать метод проведения настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации дипольных источников. Генерация диполей будет производиться в обтекания заглушенной камере С помощью дозвуковым турбулентным воздушным потоком тонкого металлического стержня цилиндрической формы и Для прямоугольной пластины. подтверждения работоспособности тонкой разработанного метода необходимо провести сравнительный анализ полученных карт локализации с результатами, полученными с помощью антенны, настроенной традиционным образом.

### 4.1. Реализация алгоритма пост-обработки для эффективной локализации звуковых источников дипольного типа

В мировой практике реализация алгоритмов локализации акустических диполей была проведена различными исследователями [14, 17, 24, 110, 111]. Существует два основных подхода при разработке данного метода. Первый подход заключается в коррекции акустических сигналов, формирующих матрицу взаимных спектров, после которой процедура пост-обработки выполняется традиционным способом [13]. Однако данный метод требует существенных вычислительных ресурсов (из-за неидеального совмещения фаз сигналов) и ограничен только одним фиксированным дипольным источником. Второй подход заключается в коррекции непосредственно самого алгоритма пост-обработки, которая выполняется путем модификации направляющего вектора с учетом ориентации дипольного момента относительно плоскости микрофонной антенны. Именно данный подход был реализован в настоящей работе. Как и в случае традиционного монопольного алгоритма, на первом этапе производится преобразование сигналов акустического давления, регистрируемого каждым из микрофонов, в Фурье-пространство:

$$p_m(t) \xrightarrow{FFT} P_m(\omega),$$

где  $p_m(t)$  – звуковое давление во временной области,  $P_m(\omega)$  – звуковое давление в частотной области.

На следующем этапе из преобразованных сигналов формируется двумерная матрица взаимных спектров с размерностью [ $N \times N$ ], каждый элемент которой выражается в виде  $C_{mn} = \overline{P_m(\omega)P_n^*(\omega)}$ , согласно выражению (1).

Аналогично монопольному алгоритму локализации, формируется теоретическая матрица взаимных спектров с неизвестной мощностью источника, после чего на основе минимизации методом наименьших квадратов проводится приближение модельной матрицы взаимных спектров к экспериментальной за счет выбора величин мощностей для каждой точки дискретной сетки:

$$F(\omega)_{j} = \sum_{(m,n)\in S} \left| C_{mn}^{\exp} - C_{mn}^{\mathrm{mod}} \right|_{j}^{2} = \sum_{(m,n)\in S} \left| C_{mn} - Ag_{m}g_{n}^{*} \right|_{j}^{2},$$

где  $F(\omega)$  – функция ошибок (расхождений между экспериментально полученными данными акустических сигналов с их теоретическим представлением). Аналитическое решение для нахождения неизвестных мощностей сигналов для каждой точки сетки *j* на определенной частоте  $\omega$  можно записать в традиционном виде, представленном ранее в выражении (2).

Ключевым моментом в реализации дипольного алгоритма локализации является выбор направляющих функций **g**. В отличие от монопольного источника, акустический диполь имеет свойство направленности – косинусоидальной зависимости величины амплитуды от угла падения звуковой волны относительно наблюдателя (в данном случае, относительно плоскости установки микрофонной антенны). С учетом данного факта, направляющие векторы для продольных и поперечных (x и y) диполей соответственно можно записать как [24, 112]:

$$g_{nj}^{x}(\omega, \vec{\mathbf{r}}_{n}, \vec{\mathbf{r}}_{j}) = \frac{e^{-ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|}}{2k\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|^{2}} \left(-1 + ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|\right) \cos\phi = \frac{e^{-ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|}}{2k\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|^{3}} \left(x_{n} - x_{j}\right) \left(-1 + ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|\right),$$

$$g_{nj}^{y}(\omega, \vec{\mathbf{r}}_{n}, \vec{\mathbf{r}}_{j}) = \frac{e^{-ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|}}{2k\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|^{2}} \left(-1 + ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|\right) \cos\phi = \frac{e^{-ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|}}{2k\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|^{3}} \left(y_{n} - y_{j}\right) \left(-1 + ik\|\vec{r_{n} - r_{j}}\|\right),$$

где  $x_n$  и  $y_n$  – проекции координат микрофонов на оси Ox и Oy соответственно,  $x_j$  и  $y_j$  – проекции координат сканируемых точек сетки на оси Ox и Oyсоответственно,  $\cos\phi$  и  $\cos\theta$  – косинусы углов азимута и места соответственно (относительно плоскости установки микрофонной антенны).

Для удобства проведения последующих вычислений, алгоритм можно переписать в матричной форме. Пусть вектор  $\mathbf{g}_j$  – направляющий вектор с размерностью [ $N \times 1$ ], содержащий в себе набор функций  $g_{nj}$ , связывающих между собой позиции всех микрофонов *n* в антенне с положением определенной точки сетки *j* на определенной частоте;  $\overline{\mathbf{C}}$  – матрица взаимных спектров с размерностью [ $N \times N$ ], с обнуленной главной диагональю, содержащая в себе все комбинации акустических сигналов  $C_{mn}$  ( $m \neq n$ ) в частотной области на определенной частоте;  $\mathbf{w}_j = \mathbf{g}_j / \sqrt{\sum_{(m,n) \in S, m \neq n}} |g_{nj}|^2$  – весовой вектор с

размерностью [ $N \times 1$ ]. Таким образом, аналитическое решение для нахождения значений оценочной мощности сигналов для определенной точки сетки можно записать в матричной форме, по аналогии с выражением (3):

$$A_{j} = \frac{\mathbf{g}_{j}^{*} \mathbf{C} \mathbf{g}_{j}}{\sum_{(m,n)\in S, \ m\neq n} \left| \mathcal{g}_{mj} \right|^{2} \left| \mathcal{g}_{nj} \right|^{2}} = \mathbf{w}_{j}^{*} \overline{\mathbf{C}} \mathbf{w}_{j},$$

или, в случае использования полной версии матрицы C без обнуления главной диагонали, данное соотношение будет соответствовать выражению (2).

Для экономии времени и проведения первичной отладки программного кода, предварительное подтверждение работоспособности оформленного алгоритма лучше всего проводить на аналитических моделях, либо с помощью вычислительного эксперимента, так как в этом случае возможно быстрое и эффективное выявление возможных ошибок. В данной работе были реализованы оба этих подхода перед проведением экспериментальных исследований.

Для первичной верификации дипольного алгоритма был сгенерирован виртуальный дипольный источник с частотой излучения 1500 Гц в некоторой области пространства XYZ точке с координатами  $(x, y, z) = \{0; 0; 0\}$ . Ориентация дипольного момента относительно микрофонной антенны соответствовала симуляции звукового поля, индуцируемого поперечным у-диполем. В качестве точек для снятия звукового давления был использован набор координат, соответствующий расположению микрофонов 54-канальной В антенне Bruel & Kjaer (см. рисунок 21). Плоскость виртуальной микрофонной антенны была удалена параллельно плоскости расположения источника на один диаметр своей описанной окружности; следовательно, центр виртуальной микрофонной антенны находился в точке  $(x_1, y_1, z_1) = \{0; 0; 2.5\}$  м. Результаты локализации представлены на рисунке 32. Слева представлена локализация акустического диполя традиционным монопольным алгоритмом (Conventional Beamforming), справа представлена локализация того же источника модифицированным дипольным алгоритмом. Динамический диапазон представленных карт локализации составляет 10 дБ.



Рисунок 32 – Локализация акустического диполя с помощью виртуальной микрофонной антенны: (а) – традиционный монопольный алгоритм;
(б) – модифицированный дипольный алгоритм. Частота излучения 1500 Гц

Как можно увидеть, традиционный монопольный алгоритм некорректно определяет как положение, так и уровень звукового давления диполя в заданной ориентации дипольного момента. Доминирующие звуковые источники идентифицируются в качестве двух монополей с эквивалентной амплитудой, равноудаленных относительно точки генерации виртуального диполя, что может привести к возникновению критических ошибок при проведении исследований с использованием микрофонных антенн экспериментальной В задачах аэроакустики. Путем применения модифицированного алгоритма локализации становится возможным реконструировать как положение, так и уровень звукового давления генерируемого акустического диполя. Однако, как можно заметить, на финальной карте локализации наблюдается значительное проявление паразитных боковых лепестков, снижающих в данном случае эффективный динамический диапазон приблизительно до 4.5 дБ. Данный факт косвенно подтверждает значимость разработки новых методов настройки микрофонных антенн для эффективной локализации акустических диполей.

С учетом актуальности локализации диполей для задач аэроакустики, для дополнительной верификации разработанного алгоритма было принято решение провести численное моделирование шума обтекания цилиндра с целью генерации дипольных источников звука [113]. Результаты численного моделирования будут являться исходными данными в качестве звукового давления, регистрируемого виртуальными микрофонами. Для создания модельного акустического диполя был выполнен вычислительный эксперимент обтекания потоком цилиндра в нескольких пространственных ориентациях с последующим проведением локализации генерируемого диполя с помощью виртуальной микрофонной применением модифицированного дипольного алгоритма антенны с ДЛЯ процедуры пост-обработки.

Условия проведения эксперимента и спектр экспериментально измеренного уровня звукового давления были взяты из работы [114]. В эксперименте задавались следующие параметры: равномерная скорость на входе равна U = 72 м/с, диаметр цилиндра равен D = 0.01 м, что соответствует числу

82

Рейнольдса Re = 46000. Частота вихреобразования составляет около 1500 Гц в этих условиях. Для нахождения нестационарных полей давления, скорости и плотности вокруг цилиндра был использован газодинамический пакет ANSYS Fluent. Для расчета поля потока выполняется моделирование отсоединенных вихрей, шум в дальнем поле рассчитывается с помощью акустической аналогии Фокс Вильямса – Хоукингса [5, 115].

На рисунке 33 показана расчетная сетка. Расчетная область представляет собой прямоугольник, построенный вокруг цилиндра с размерами: 3*d* в ширину; 6*d* перед цилиндром; 14*d* после цилиндра; 5*d* над и под цилиндром. Сетка состоит из  $2.4 \times 10^5$  точек: 120 точек по окружности, 100 по радиусу и 20 по длине. Расстояние до первой точки сетки составляет  $2 \times 10^{-5}$  м, согласно *y*+ около 0.8. Из-за ограничения в расчетных ресурсах, длина сетки по размаху равна 3*D*, что аналогично другим работам по обтеканию цилиндра [114, 116, 117]. Визуализация мгновенного потока хорошо соответствует реальной картине отрывного течения при обтекании круглого цилиндра при высоких числах Рейнольдса [118].





Рисунок 33 – Расчетная сетка с граничными условиями и визуализация мгновенного потока

При проведении газодинамического расчета задавались следующие 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). При расчете использовался неявный метод контрольных объемов со вторым порядком точности по пространству и по времени и DDES-подход для моделирования турбулентности. Расчет проводился с временным шагом  $2 \times 10^{-5}$  с. Количество временных шагов в расчете составляло 16000. Для примера на рисунке 33 представлено полученное в расчете мгновенное поле скорости в среднем по длине цилиндра сечении.

Подход акустической аналогии означает, что моделирование потока и расчет шума выполняются отдельно, а шум в дальнем поле может быть получен из потока в ближнем поле. Для определения шума в дальнем поле производилась запись в файлы нестационарных полей давления, плотности и скорости на поверхности Кирхгофа. Выбранная поверхность Кирхгофа представляет собой цилиндрическую поверхность с радиусом, равным 1 диаметру цилиндра, и с осью, совпадающей с осью цилиндра (см. рисунок 33).

Нестационарные поля на поверхностях Кирхгофа последовательно использовались для расчета акустической аналогии Фокс Вильямса – Хоукингса в точке, где производился замер уровня звука в эксперименте. Эта точка находится на расстоянии 0.15 м вверх по потоку и на расстоянии 1.85 м над цилиндром.

Для полученных сигналов было выполнено преобразование Фурье и спектральная мощности (Power Spectral определена плотность Density, сокр. PSD [119]). В связи с тем, что в расчете использовалась область длиной 3d, а в эксперименте длина цилиндра составляла 30d, производилась коррекция по уровню шума. В соответствии с работой [114], величина коррекции составляла 15 дБ. Сравнение спектров шума в данной точке показано на рисунке 34. Как можно увидеть, результаты расчета хорошо предсказывают уровень пика в спектре и уровень широкополосного сигнала. Частота пика в расчете составляет 1450 Гц, что так же хорошо соотносится с частотой в спектре, полученном экспериментально (около 1500 Гц). Число Струхаля в этом случае составляет  $Sh \approx 0.2$ , что хорошо соответствует результатам для такого типа течений.



Рисунок 34 – Сравнение спектра, полученного в результате численного моделирования в точке {0.15; -1.85; 0.00}, с экспериментальными данными, полученными в работе [114]

Для определения направленности излучения шума в акустический расчет были добавлены дополнительные точки установки виртуальных микрофонов, расположенные на окружности радиусом 1 м с шагом 10 градусов, в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра и проходящей через его середину. Зависимость уровня звукового давления от угла для основной частоты срыва вихрей (1450 Гц) представлена на рисунке 35. Как видно из графика, направленность излучения шума имеет форму «восьмерки», что характерно для акустических диполей [120].



Рисунок 35 – Направленность излучения на частоте вихреобразования 1450 Гц

На следующем этапе для построения частотного спектра компонент продольного и поперечного диполей было решено измерить звуковое давление дополнительно еще в двух точках, равноудаленных симметрично относительно оси потока на расстояние 1 м в плоскости среза сопла, для имитации применения упрощенного азимутального разложения звукового поля, опирающегося на основные принципы и уравнения метода азимутальной декомпозиции (МАД), как было выполнено специалистами ЦАГИ [17]. Сигналы, соответствующие продольному (мода  $a_0$ ) и поперечному (мода  $a_1$ ) диполям, выражаются в виде:

$$\frac{a_0(x,t) \approx (p_1(x,t) + p_1(x,t))/2,}{a_1(x,t) \approx (p_1(x,t) - p_1(x,t))/2.}$$
(11)

Соответствующие спектры сигналов показаны на рисунке 36. Максимальный уровень звукового давления для поперечного диполя составил 94.2 дБ на частоте 1450 Гц.



Рисунок 36 – Спектры продольного и поперечного диполей, полученные путем имитации применения упрощенного азимутального разложения звукового поля

Далее проводилась локализация источников шума обтекания цилиндра с помощью виртуальной микрофонной антенны. Для этого вычислительный эксперимент был выполнен для двух пространственных ориентаций цилиндра: в первом случае продольная ось цилиндра пересекала центр микрофонной антенны,

во втором случае была параллельна плоскости микрофонной антенны и плоскости среза сопла. Если в первом случае рассматривалась классическая генерация акустического диполя в плоскости, параллельной антенне, то второй случай был выполнен для проверки корректности определения интенсивности излучения генерируемого диполя разработанным алгоритмом локализации: в данной пространственной ориентации область скачка фазы сигнала направлена прямо на антенну, и локализуемый монопольным алгоритмом уровень звукового давления в пике излучения сопоставим с уровнем звукового давления исходного диполя [14, 17, 121]. Таким образом, с помощью традиционного монопольного метода Conventional Beamforming возможно провести отладку создаваемого алгоритма локализации акустических диполей на различных этапах его разработки.

В качестве точек для снятия звукового давления был использован набор координат, соответствующий расположению микрофонов в 54-канальной антенне Bruel & Kjaer Type WA-1676-W-003, имеющейся в Центре акустических исследований ПНИПУ. Варианты расположения цилиндра относительно плоскости антенны показаны на схеме на рисунке 37. Результаты локализации шума обтекания цилиндра для данных положений показаны на рисунке 38. Схематическое изображение ориентации цилиндра показано в центре карты.



Рисунок 37 – Расположение виртуальных антенн относительно цилиндра

87





(а) – монопольный алгоритм, антенна в позиции 1; (б) – дипольный алгоритм, антенна в позиции 1; (в) – монопольный алгоритм, антенна в позиции 2

На рисунках 38 (а) и 38 (б) продольная ось цилиндра перпендикулярна плоскости микрофонной антенны (позиция 1), на рисунке 38 (в) параллельна ей (позиция 2). На рисунке 38 (a) представлен монопольный Conventional Beamforming алгоритм, на рисунке 38 (б) дипольный алгоритм, И на рисунке 38 (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 38 (б). Как можно увидеть, данные уровни отличаются не более, чем на 1 дБ, что свидетельствует о корректной работе дипольного алгоритма локализации. Также дополнительное сравнение уровня звукового давления поперечного диполя на частоте 1450 Гц, полученного путем построения спектра с помощью упрощенного азимутального разложения звукового поля, с уровнем пика на карте локализации акустического диполя, полученного с помощью разработанного алгоритма (рисунок 38 (б)), показало сопоставимые результаты, отличающиеся не более чем на 1 дБ. Таким образом, можно заключить, что вычислительный эксперимент поставлен корректно И хорошо согласуется с данными, полученными другими исследователями.

Верифицированный дипольный алгоритм был оформлен в программный код и добавлен в разработанное программное обеспечение, функционал которого подробно описан в разделе 2.2. Аналогично монопольному методу Cross-Spectral Beamforming, с целью снижения уровней паразитных боковых лепестков и получения более чистой карты локализации, в алгоритм было добавлено обнуление главной диагонали матрицы взаимных спектров с введением нормирующего коэффициента для коррекции уровня звукового давления.

# 4.2. Развитие математической модели настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации звуковых источников дипольного типа

Ha этапе разработки метода настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации акустических диполей в качестве основной идеи для реализации являлась корректировка существующей математической модели, разработанной специалистами компании Bruel & Kjaer [9]. Данный метод основан на построении диаграммы направленности в заданном диапазоне проекций волновых чисел и используется для настройки микрофонных антенн на локализацию монопольных звуковых источников, так как одним из главных допущений метода является инвариантность диаграммы направленности к сдвигу. Смысл построения диаграммы направленности состоит в визуализации отклика микрофонной антенны (в виде боковых лепестков) на волновые векторы, падающие с направлений, отличных от фокусного; в случае совпадения с фокусным направлением достигается максимум целевой функции, формирующий основной лепесток. Далее проводится оценка радиального профиля диаграммы направленности, на основе которой строится функция максимального уровня боковых лепестков, в дальнейшем используемая в качестве целевой функции для постановки задачи оптимизации. Подробно данный метод настройки описан в разделе 3.2.

Как было описано ранее, разработка математической модели оптимизации начинается с формирования целевой функции. Для вывода целевой функции делается допущение, что микрофонная антенна располагается в дальнем поле;

89

следовательно, расстояние между антенной и акустическим источником достаточно велико для представления звуковых сигналов, достигающих микрофонов, в качестве плоских волн. Исходя из этого, интерес представляет только направление падения звуковых волн. Путем минимизации невязки между вектором с теоретическим представлением звуковых давлений  $\mathbf{P}_{mod}$  и вектором регистрируемых микрофонами звуковых давлений  $\mathbf{P}_{meas}$  с помощью метода наименьших квадратов, можно получить решение  $\hat{P}_0(\omega)$  для оценки амплитуд звуковых источников, как было описано ранее с помощью уравнения (4).

В случае излучения дипольного звукового источника необходимо учитывать угол падения плоской волны относительно плоскости установки микрофонной антенны, так как, в отличие от акустического монополя, акустический диполь имеет свойство направленности – косинусоидальной зависимости величины амплитуды от угла падения звуковой волны относительно наблюдателя. С учетом данного факта, вектор регистрируемых микрофонами звуковых давлений  $\mathbf{P}_{meas}$ , индуцируемых источником с единичной амплитудой и волновым вектором  $\vec{k}_0$ , можно записать в виде:

$$\mathbf{P}_{meas} = \begin{bmatrix} e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_1} \cos \theta_0 \\ \vdots \\ e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_N} \cos \theta_0 \end{bmatrix},$$

а направляющий вектор, определяющий связь между антенной и точкой сетки в направлении волнового вектора  $\vec{k_1}$ , будет равен:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} \cos \theta_1 \\ \vdots \\ e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_N} \cos \theta_1 \end{bmatrix},$$

где  $\cos \theta_0 = \hat{k}_0 / |\vec{k}|$ ,  $\cos \theta_1 = \hat{k}_1 / |\vec{k}|$  – косинусы углов падения волновых векторов относительно плоскости расположения антенны;  $\hat{k}_0$ ,  $\hat{k}_1$  – проекции волновых векторов на плоскость расположения антенны;  $|\vec{k}_0| = |\vec{k}_1| = |\vec{k}|$  – модуль волновых

векторов (волновое число). Схематическое изображение данных параметров показано на рисунке 39.



Рисунок 39 – Схематическое изображение волновых векторов и их проекций

В итоге можно записать:

$$\mathbf{g}^{*}\mathbf{P}_{meas} = \left(e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{1}}e^{i\vec{k}_{0}\cdot\vec{r}_{1}}\cos\theta_{0}\cos\theta_{1} + \ldots + e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{N}}e^{i\vec{k}_{0}\cdot\vec{r}_{N}}\cos\theta_{0}\cos\theta_{1}\right),\\ \mathbf{g}^{*}\mathbf{g} = \left(e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{1}}e^{i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{1}}\cos^{2}\theta_{1} + \ldots + e^{-i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{N}}e^{i\vec{k}_{1}\cdot\vec{r}_{N}}\cos^{2}\theta_{1}\right) = N\cos^{2}\theta_{1}.$$

Следовательно, уравнение (4) можно переписать в виде:

$$\hat{P}_{0}(\omega) = \frac{\mathbf{g}^{*}\mathbf{P}_{meas}}{\mathbf{g}^{*}\mathbf{g}} = \frac{\cos\theta_{0}\cos\theta_{1}}{\cos^{2}\theta_{1}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} e^{-i(\vec{k}_{1}-\vec{k}_{0})\vec{r}_{n}} = \frac{\cos\theta_{0}}{\cos\theta_{1}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} e^{-i(\vec{k}_{1}-\vec{k}_{0})\vec{r}_{n}}$$

Для наглядности были построены две диаграммы направленности, соответствующие расположению микрофонов в 54-канальной антенне Bruel & Kjaer. На рисунке 40 (а) показана диаграмма, соответствующая падению на антенну плоских волн от монопольного источника, на рисунке 40 (б) – от дипольного источника с учетом косинусоидальной направленности амплитуды падения волн в зависимости от точки наблюдения.



Рисунок 40 – Визуализация диаграммы направленности 54-канальной микрофонной антенны Bruel & Kjaer, построенная на основе:

(а) – излучения монопольного источника; (б) – излучения дипольного источника

Как можно заметить, результаты отклика микрофонной антенны на падение звуковой волны от дипольного источника больше не инвариантны к сдвигу по отношению к проекциям волновых векторов. При сканировании направлений падения звуковых волн, близких к перпендикулярным относительно плоскости антенны, косинус угла  $\theta_1$ , определяющий длину проекции  $\hat{k}_1$ , начинает стремиться к нулю, вследствие чего устремляет апертурную сглаживающую функцию в бесконечность. Исходя из всего вышеперечисленного, сформировать целевую функцию, зависящую только от вектора координат микрофонов антенны, в частотной области проекций только одного вектора (в отличие от диаграммы направленности , построенной в частотной области проекций одного вектора разности  $\vec{K} = \vec{k}_1 - \vec{k}_0$  в монопольной схеме), не представляется возможным.

Приняв во внимание описанные выше обстоятельства, для усовершенствования математической модели было решено использовать прямой расчет локализации акустического диполя, находящегося на известном конечном расстоянии относительно плоскости размещения микрофонной антенны. Данное решение было принято исходя из следующих соображений: при рассмотрении радиального профиля максимального уровня боковых лепестков на различных частотах было выявлено, что при повышении частоты происходит сжатие профиля по оси абсцисс в сторону главного лепестка, однако форма профиля остается практически неизменной. Также было установлено, что с ростом частоты наблюдаются колебания лепестков по уровню звукового давления, что в дальнейшем необходимо исследовать более тщательно для минимизации возможных погрешностей. Таким образом, было принято решение оценивать радиальный профиль только на верхней граничной частоте оптимизации.

Для обеспечения высокой вычислительной скорости вместо выполнения полного алгоритма локализации, включающего в себя вычисление матрицы взаимных спектров, была использована функция рассеяния точки (Point Spread Function, или PSF). Данная функция описывает отклик микрофонной антенны на единичный точечный источник. Как было описано в предыдущих главах, аналитическое решение для нахождения неизвестных мощностей сигналов для каждой точки сетки *j* на определенной частоте  $\omega$  можно записать в виде выражения (3). Матрицу взаимных спектров, индуцируемую точечным источником с единичной амплитудой в точке с индексом *j*, можно записать как **C**<sub>*j*</sub> = **g**<sub>*j*</sub>**g**<sup>\*</sup><sub>*j*</sub>. Следовательно, аналитическое решение для нахождения амплитуд, основанное на применении PSF, запишется в виде:

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

где *j*, *k* – индексы точек дискретной сетки. По определению мы имеем  $A_{jk} = 1$  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 функции рассеяния точки (PSF) с поправкой на дипольный источник, необходимо заменить

направляющие векторы на соответствующие продольному или поперечному акустическому диполю:

$$A_{jk}^{x} = \frac{\mathbf{g}_{k}^{x^{*}} \left[ \overline{\mathbf{g}_{j}^{x} \mathbf{g}_{j}^{x^{*}}} \right] \mathbf{g}_{k}^{x}}{\sum_{(m,n)\in S, m\neq n} \left| g_{mk}^{x} \right|^{2} \left| g_{nk}^{x} \right|^{2}} = \mathbf{w}_{k}^{x^{*}} \left[ \overline{\mathbf{g}_{j}^{x} \mathbf{g}_{j}^{x^{*}}} \right] \mathbf{w}_{k}^{x},$$
$$A_{jk}^{y} = \frac{\mathbf{g}_{k}^{y^{*}} \left[ \overline{\mathbf{g}_{j}^{y} \mathbf{g}_{j}^{y^{*}}} \right] \mathbf{g}_{k}^{y}}{\sum_{(m,n)\in S, m\neq n} \left| g_{mk}^{y} \right|^{2} \left| g_{nk}^{y} \right|^{2}} = \mathbf{w}_{k}^{y^{*}} \left[ \overline{\mathbf{g}_{j}^{y} \mathbf{g}_{j}^{y^{*}}} \right] \mathbf{w}_{k}^{y},$$

где:

$$g_{nj}^{x}\left(\omega,\vec{\mathbf{r}}_{n},\vec{\mathbf{r}}_{j}\right) = \frac{e^{-ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|}}{2k\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|^{2}} \left(-1+ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|\right) \cos\phi = \frac{e^{-ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|}}{2k\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|^{3}} \left(x_{n}-x_{j}\right) \left(-1+ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|\right),$$

$$g_{nj}^{y}\left(\omega,\vec{\mathbf{r}}_{n},\vec{\mathbf{r}}_{j}\right) = \frac{e^{-ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|}}{2k\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|^{2}} \left(-1+ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|\right) \cos\phi = \frac{e^{-ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|}}{2k\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|^{3}} \left(y_{n}-y_{j}\right) \left(-1+ik\left\|\vec{r_{n}-r_{j}}\right\|\right),$$

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

### 4.3. Настройка микрофонной антенны на оптимальное качество локализации звуковых источников дипольного типа

При проведении настройки микрофонной антенны на оптимальное качество локализации акустических диполей было решено использовать геометрическую конфигурацию, аналогичную 54-канальной микрофонной антенне Bruel & Kjaer. Конструкция данной антенны состоит из 9 лучей равной длины, закрепленных на центральном теле диаметром около 0.3 м, размещенных по окружности с

равномерным угловым шагом (40°) и формирующих виртуальную описанную окружность диаметром 2.5 метра; на каждом луче располагается по 6 точек для установки микрофонов, положения которых идентичны на каждом луче. Данное решение было принято, во-первых, для обеспечения сопоставимой величины разрешающей способности антенны, напрямую зависящей от диаметра описанной наиболее удаленными от центра микрофонами окружности; во-вторых, для демонстрации достижения более эффективной локализации акустических диполей путем проведения настройки антенны при соблюдении прочих равных условий: общего числа микрофонов, конструктивных особенностей лучевой антенны и соответствия её основных геометрических параметров; таким образом, нет необходимости приобретать дополнительные дорогостоящие измерительные датчики для повышения качества локализации акустических диполей.

Постановка задачи условной оптимизации выполнялась в математическом пакете прикладных программ MATLAB. На значения аргументов накладывались следующие ограничения: отклонение координаты наиболее удаленного от центра микрофона –  $\pm 0.05$  м для обеспечения вариативности получаемых координат при сохранении ширины полосы (Bandwidth) главного лепестка в точке половинной мощности примерно в одних и тех же пределах; верхняя частота излучения, используемая для проведения оптимизации – 5000 Гц; расстояние между каждой парой соседних микрофонов на луче – не менее 0.04 м для обеспечения достаточного пространства при установке пластиковых державок; расстояние от 2.5 плоскости положения антенны ДО виртуального источника Μ. воображаемой описанной окружности соответствующее одному диаметру антенны и являющееся наиболее оптимальным при проведении акустических измерений; радиус области сканирования для построения сетки – 1.45 м, рассчитанный по соотношению L = 1.15z (где L – диаметр области, z – расстояние до плоскости антенны), что соответствует радиусу охватываемой антенной области при угле раскрытия 30°. Значение данного угла определяется исходя из оценки величины разрешающей способности в общем виде в зависимости от угла падения волнового фронта относительно оси, направленной по нормали к плоскости размещения антенны, что было описано ранее с помощью выражения (9). В соответствии с анализом поведения функции, задаваемой соотношением  $R(\theta)/R_{Axis} = 1/\cos^3(\theta)$ , на интервале  $\theta = (-90^\circ...90^\circ)$ , ограниченном ближайшими (относительно оси Оу) точками разрыва второго рода, установлено, что при значениях угла раскрытия более 30° проявляется рост величины разрешающей способности  $R(\theta)$  более чем на 50% относительно величины  $R_{Axis}$  (10) в случае осевого падения волн, что влечет за собой снижение минимально возможного расстояния для разделения близкорасположенных звуковых источников и, как следствие, ухудшение общего качества построения карты локализации. По этой причине на практике угол раскрытия часто ограничивается значением 30°. области Схематическое представление расчета радиуса сканирования представлено на рисунке 41.



Рисунок 41 – Схематическое представление охватываемой антенной области при угле раскрытия 30° [9]

Решение оптимизационной задачи производилось с помощью встроенных функций пакета «Optimization Toolbox» с помощью метода «Minimax» [84, 122]. Число наборов координат микрофонов, используемых в качестве начальных условий для проведения вычислений, составляло более 100 тыс. После вычисления каждой итерации, путем оценки функции максимального уровня боковых лепестков, определялся динамический диапазон, соответствующий

текущему набору координат. Сохранялись только те результаты, величина динамического диапазона которых достигала более 6 дБ по абсолютной величине. Для обеспечения сопоставимого разрешения дополнительно контролировалась величина ширины полосы главного лепестка относительно ширины полосы, рассчитанной для набора микрофонов антенны Bruel & Kjaer; расхождение данных параметров не должно было превышать 5%. Ширина полосы рассчитывалась в точке -3 дБ главного лепестка. Для получения более точного значения пространственной координаты данной точки применялась одномерная линейная интерполяция с помощью встроенной в пакет функции.

На каждой итерации оценивался радиальный профиль карты локализации для выявления максимального уровня боковых лепестков в заданной круговой области. Для повышения вычислительной скорости было решено воспользоваться свойством симметричности карты локализации точечного источника, формируемой лучевой антенной с равномерным угловым шагом и идентичным распределением микрофонов на каждом луче. С учетом данной особенности, рассчитывалась только одна половина карты, после чего, путем отражения относительно оси симметрии, достраивалась вся область визуализации. Шаг изменения радиуса был равен ширине одной ячейки сетки (0.01 м). Для выполнения процедуры полукольцевой выборки координат точек ИЗ прямоугольной сетки применялись операции округления до ближайших ячеек.

Для нахождения первого минимума функции после главного лепестка, соответствующего параметру  $K^{0}_{min}$  (по аналогии с первым минимумом функции диаграммы направленности) и представляющего собой начало отсчета диапазона изменения максимального уровня боковых лепестков, проводилось численное дифференцирование с применением метода правосторонней разности.

После проведения вычислительных операций было найдено оптимальное распределение микрофонов в лучевой микрофонной антенне, удовлетворяющее заданным параметрам. При сопоставимом значении разрешения, прирост динамического диапазона данного набора составил около 2 дБ в ширине полосы до 5000 Гц. Найденное распределение координат микрофонов представлено на

рисунке 42. Сравнение функций максимального уровня боковых лепестков, соответствующих оптимальному набору координат и набору размещения микрофонов в антенне Bruel & Kjaer, представлено на рисунке 43. В качестве дополнительной проверки, вызванной колебаниями уровней боковых лепестков при изменении частоты, был проведен анализ карт локализации во всей полосе частот с шагом 50 Гц. Установлено, что величина расхождений не превышает допустимых значений.

Далее проводилась первичная верификация оптимального набора координат для настройки антенны с помощью аналитически заданных акустических диполей. Результаты локализации диполя с частотой 1500 Гц представлены на рисунке 44. Для сравнения показаны карты локализации диполей с помощью микрофонной антенны Bruel & Kjaer, настроенной на оптимальное качество локализации монополей. Как можно увидеть, прирост динамического диапазона 2 дБ. настроенной антенны на различных частотах составляет около Динамический диапазон карт локализации составляет 10 дБ.



Рисунок 42 – Найденное распределение координат установки микрофонов в антенну для оптимальной локализации акустических диполей



Рисунок 43 – Сравнение функций максимального уровня боковых лепестков дипольно-настроенной микрофонной антенны с антенной Bruel & Kjaer



Рисунок 44 – Результаты локализации виртуального диполя с частотой излучения 1500 Гц: (а) – антенна Bruel & Kjaer; (б) – антенна с дипольной настройкой

99

## 4.4. Экспериментальные исследования локализации источников шума дипольного типа в акустической заглушенной камере с помощью настроенной микрофонной антенны

Экспериментальные исследования локализации источников шума дипольного типа с помощью микрофонных антенн проводились в акустической заглушенной камере Центра акустических исследований ПНИПУ. Для проведения последующего сравнительного анализа в измерениях были задействованы обе микрофонных антенны. В качестве механизма для генерации акустических 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. Обе антенны располагались на расстоянии 2.5 м (одного диаметра своей описанной окружности) параллельно оси струи. В продольном направлении образом, чтобы распределения антенна устанавливалась таким область предполагаемого акустического источника находилась как можно ближе к центру карты локализации.

Ha первом экспериментальных исследований этапе проводилась локализация источников шума обтекания цилиндра. Эксперимент был выполнен для двух случаев пространственной ориентации цилиндра: в первом случае продольная ось цилиндра пересекала центр микрофонной антенны, во втором случае была параллельна плоскости микрофонной антенны и плоскости среза Если в первом случае рассматривалась сопла. классическая генерация акустического диполя в плоскости, параллельной антенне, то второй случай был выполнен для проверки корректности определения интенсивности излучения генерируемого диполя разработанным алгоритмом локализации: в данной пространственной ориентации область скачка фазы сигнала направлена прямо на антенну, и локализуемый монопольным алгоритмом уровень звукового давления в пике излучения сопоставим с уровнем звукового давления исходного акустического диполя. Таким образом, с помощью традиционного монопольного метода Conventional Beamforming возможно провести отладку создаваемого

алгоритма локализации акустических диполей на различных этапах его разработки, как было описано в разделе 4.1. Варианты расположения цилиндра относительно плоскости микрофонной антенны показаны на схеме на рисунке 45.



Рисунок 45 – Ориентация микрофонных антенн относительно тонкого металлического стержня

В системе генерации воздушной турбулентной струи использовалось диаметром 50 металлическое коническое сопло MM. Диаметр тонкого металлического стержня был равен 5 мм, расстояние от среза сопла до цилиндра составляло 6.25 калибров (312.5 мм). Стержень был закреплен на металлической стойке. Контроль плоскостей расположения микрофонной антенны и стержня относительно среза сопла и оси струи производился с помощью лазерного уровня (нивелира) Bosch UniversalLevel 2, как показано на рисунке 46. Запись сигналов звукового давления производилась в проприетарном программном обеспечении Bruel & Kjaer PULSE Labshop. Набор координат микрофонов, соответствующий расположению микрофонов в настроенной антенне, был записан в *xml*-файл в качестве точек для снятия звукового давления и добавлен в приложение для удобства проведения измерений. После записи данные конвертировались в формат *mat*-файлов и обрабатывались в собственном программном продукте.

Длина записи звуковых сигналов составляла 5 с. Подготовленные к акустическим измерениям микрофонные антенны представлены на рисунке 47.



Рисунок 46 – Контроль плоскостей размещения микрофонной антенны и металлического стержня относительно среза сопла и оси струи



Рисунок 47 – Подготовленные к акустическим измерениям микрофонные антенны: слева – фирменная антенна Bruel & Kjaer; справа – дипольнонастроенная лучевая антенна

Для построения частотного спектра компонент продольного и поперечного диполей с целью определения частоты пика излучения поперечного диполя было решено провести регистрацию звукового давления дополнительно еще в 6 точках (по 2 микрофона в 3 параллельных плоскостях) для применения упрощенного азимутального разложения звукового поля, как было выполнено специалистами ЦАГИ [17]. Каждая пара микрофонов была удалена перпендикулярно оси потока на расстояние 0.75 м, первая плоскость находилась в плоскости расположения цилиндра, вторая и третья плоскости были удалены от первой на 0.5 м и на 1 м соответственно. Схема установки микрофонов показана на рисунке 48. Сигналы, сыли вычислены по формуле (11). Соответствующие спектры сигналов показаны на рисунке 49.



Рисунок 48 – Схема проведения измерений дипольных составляющих шума обтекания цилиндра с помощью 2-микрофонной решетки в трех плоскостях



Рисунок 49 – Спектральные характеристики продольного (мода *a*<sub>0</sub>) и поперечного (мода *a*<sub>1</sub>) диполей, полученные с помощью азимутального разложения звукового поля в плоскости, соответствующей плоскости размещения цилиндра

Максимальный спектральной уровень плотности мощности ДЛЯ поперечного диполя составил 66 дБ на частоте около 3200 Гц. Дополнительно была смоделирована кривая распределения интенсивности модельного дипольного источника, рассчитанная в зависимости от изменения продольной координаты (параллельно оси струи), что было сделано для проведения экспериментально сравнительного анализа С полученными точками ДЛЯ доминирующей (в области расположения цилиндра) моды  $a_1$  антисимметричной относительно оси струи [18]. Уровень звукового давления, соответствующий представленной кривой спектральной плотности мощности, а также положение диполя по оси, параллельной оси струи, подбиралось путем наилучшего соответствия с экспериментально полученными точками. Радиус виртуальной окружности, описываемой 2-микрофонной решеткой, составлял 1.5 м. Ширина полосы для вычисления спектральной плотности мощности составляла 256 Гц. В результате был получен модельный диполь, находящийся в точке x = 0.1 м

относительно положения среза сопла с координатой x = 0 м, и излучающий с интенсивностью, эквивалентной 88 дБ. Результаты сравнительного анализа распределения интенсивности модельного диполя С экспериментально полученными точками для антисимметричной моды представлены на рисунке 50. Результаты локализации источников шума обтекания цилиндра показаны на рисунке 51. Динамический диапазон дипольных карт 7 дБ, монопольных карт 5 дБ. Ширина полосы, в которой рассчитывалась область локализации, во всех картах составляет 256 Гц относительно центральной 3200 частоты Гц. соответствующей частоте пика.



Рисунок 50 – Результаты сравнительного анализа распределения интенсивности модельного диполя с экспериментально полученными точками для антисимметричной моды



Рисунок 51 – Локализация шума обтекания цилиндра с помощью двух микрофонных антенн: (а), (б) – монопольный алгоритм, антенны в позиции 1; (в), (г) – дипольный алгоритм, антенны в позиции 1; (д), (е) – монопольный алгоритм, антенны в позиции 2

По результатам локализации шума обтекания стержня можно заключить, что дипольно-настроенная антенна дает менее зашумленную карту, чем антенна Bruel & Kjaer. На рисунках 51 (а), (б) представлен традиционный монопольный алгоритм локализации; пятна распределения источников практически идентичны в обоих случаях. На рисунках 51 (в), (г) представлена обработка реализованным дипольным алгоритмом. Как можно увидеть, настроенная антенна дает повышение динамического диапазона до 2 дБ по сравнению со своим фирменным аналогом при сопоставимом разрешении – ширина основного пика практически идентична. На рисунках 51 (д), (е) представлена обработка монопольным алгоритмом при ориентации цилиндра в параллельной относительно размещения антенны плоскости. Данные карты были построены для контроля уровней звукового давления, определяемых после выполнения дипольного алгоритма: путем оценки уровней в области скачка фазы, направленного на антенну, выполняется сравнительный анализ С уровнями звукового давления локализуемого диполя. Максимальное расхождение по уровням во всех случаях не превышает 3 дБ. Среднее значение уровня звукового давления локализуемого диполя составляет около 88 дБ, что соответствует значению, полученному с помощью азимутального разложения; однако существует различие в определении положения модельного диполя (312.5 мм против 100 мм). Данный факт может объясняться недостаточным количеством экспериментальных измерительных точек, используемых в азимутальном разложении – для получения точного результата необходимо увеличение числа рассматриваемых сечений относительно положения стержня. В целом можно заключить, что эксперимент поставлен корректно и согласуется с данными, полученными другими исследователями.

В качестве еще одного случая генерации звукового поля, близкого к полю излучения акустического диполя, рассматривалось взаимодействие воздушной турбулентной струи и задней кромки тонкой пластины. Данное взаимодействие объясняется дипольным характером доминирующего в боковом направлении звукового источника, связанного с рассеянием пульсаций ближнего поля струи на задней кромке пластины [123]. Пластина была изготовлена из фанерного листа с

размерами 450×900×6 мм. При генерации воздушной струи использовалось металлическое коническое сопло диаметром 50 мм. Скорость истечения струи составляла 0.4 М. Пластина устанавливалась на каркасную металлическую систему. Расстояние от среза сопла до кромки пластины в продольном направлении составляло 3.15 калибра (157.5 мм). Расстояние от оси струи до кромки пластины в поперечном направлении было равным 1 калибру (50 мм).

Так же, как и в предыдущем случае, для проведения сравнительного анализа распределения интенсивности антисимметричной моды с распределением интенсивности излучения модельного диполя было реализовано применение упрощенного метода азимутального разложения путем установки 6 микрофонов по сечениям вдоль струи, соответствующим координатам трем оси  $\{x = 0.1575; x = 1.1575; x = 2.1575\}$  м относительно плоскости среза сопла в точке x = 0. Схема установки пластины относительно сопла и микрофонов представлена на рисунке 52. Фотографии проведения эксперимента в заглушенной камере показаны на рисунке 53. Спектры продольного и поперечного диполей, полученные с помощью азимутального разложения в плоскости задней кромки пластины, представлены на рисунке 54.



Рисунок 52 – Схема установки микрофонов относительно пластины для реализации упрощенного метода азимутального разложения звукового поля


Рисунок 53 – Фотографии проведения экспериментальных исследований в заглушенной камере



Рисунок 54 – Спектры продольного (мода *a*<sub>0</sub>) и поперечного (мода *a*<sub>1</sub>) диполей, полученные с помощью азимутального разложения звукового поля, в плоскости задней кромки пластины

Также в результате проведения сравнительного анализа распределения интенсивности модельного диполя с экспериментально полученными точками для антисимметричной моды был получен модельный диполь, находящийся в точке x = 0 м относительно положения среза сопла (с координатой x = 0) и излучающий с интенсивностью, эквивалентной 88.2 дБ. Результаты сравнительного анализа распределения интенсивности модельного диполя с экспериментально полученными точками для антисимметричной моды быле в с экспериментально полученными точками для антисимметричной моды представлены на рисунке 55.



Рисунок 55 – Результаты сравнительного анализа распределения интенсивности модельного диполя с экспериментально полученными точками для антисимметричной моды

Результаты локализации источников шума взаимодействия турбулентного потока и тонкой пластины, полученные с помощью двух микрофонных антенн, представлены на рисунке 56. Ширина частотной полосы для проведения расчета всех представленных случаях составляет 256 визуализации во Γц карт относительно центральной частоты 600 Гц, соответствующей частоте пика. На рисунках 56 (а), представлен традиционный (б) монопольный алгоритм локализации, на рисунках 56 (в), (г) представлена обработка модифицированным дипольным алгоритмом.





(Г)

Рисунок 56 – Локализация источников шума взаимодействия турбулентного потока и тонкой пластины с помощью двух микрофонных антенн: (а), (б) – монопольный алгоритм, антенна в позиции 1; (в), (г) – дипольный алгоритм

По результатам акустических измерений шума взаимодействия струи и пластины можно заключить, что результаты локализации хорошо сопоставимы. На низких частотах, в диапазоне которых находится пик доминирующего источника, пятна локализации, как и ожидалось, довольно большие, и на таких частотах, как правило, не проявляются ярко выраженные боковые лепестки, как это было в предыдущем случае с металлическим стержнем, что обычно связано с

замещением значительной области плоскости наблюдения одним главным лепестком.

Максимальное расхождение по уровням между диполями, локализуемыми обеими антеннами, не превышает 1.5 дБ. Среднее значение уровня звукового давления локализуемого диполя составляет около 88.9 дБ, что хорошо соответствует значениям, полученным с помощью азимутального разложения звукового поля (88.2 дБ). Максимум пика излучения модельного диполя соответствует координате среза сопла (x = 0), что соответствует картам локализации, показанным на рисунке 56. В целом также можно заключить, что эксперимент поставлен корректно и согласуется с данными, полученными другими исследователями.

## Выводы по Главе 4

1. Усовершенствованная математическая модель для поиска оптимальных схем установки микрофонов в антенну для высокоэффективной локализации диполей показывает высокую чувствительность уровней боковых лепестков в зависимости от положения установки микрофонов в решетку. Применение функции рассеяния точки (PSF) только на граничной частоте настройки обеспечивает минимальное количество необходимых вычислений для построения радиального профиля PSF в заданной частотной полосе за счет его продольного масштабирования при изменении частоты в фиксированной охватываемой области. Однако для исключения влияния возможных колебаний лепестков по уровню звукового давления на частотах, ниже граничной, необходимо проводить дополнительный контроль радиального профиля во всей интересующей полосе частот, начиная с его первого минимума.

2. Численное моделирование шума обтекания цилиндра для генерации модельного дипольно-индцуируемого звукового поля показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными, полученными другими исследователями, и может быть использовано для валидации и отладки реализованного дипольного алгоритма пост-обработки. Пик частотного спектра

компоненты поперечного диполя путем симуляции применения упрощенного 2-микрофонного метода азимутального разложения звукового поля определяется на частоте вихреобразования, а его значение с минимальными расхождениями соответствует интенсивности излучения модельного диполя.

3. Верификация настройки антенны с оптимальной дипольной схемой установки микрофонов с помощью виртуальных точечных диполей позволяет получить информацию о количественной оценке теоретического прироста динамического диапазона на желаемой частоте относительно коммерческой антенны с монопольной схемой настройки; для дипольной конфигурации, представленной в работе, теоретический прирост составил около 2 дБ. Как было установлено в дальнейшем, значение данного параметра подтвердилось на практике путем проведения эксперимента в лабораторных условиях.

4. Использование взаимно-перпендикулярных ориентаций установки цилиндрического стержня относительно плоскости размещения антенны дополнительный контроль позволяет провести интенсивности излучения локализуемого диполя с помощью традиционного монопольного алгоритма постобработки Conventional Beamforming, что подтверждается как в вычислительном, так и натурном эксперименте.

5. 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. В качестве механизма для генерации акустических 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.

6. Среднее значение уровня звукового давления диполя, индуцируемого обтеканием тонкого металлического стержня, составляет около 88 дБ. максимальное расхождение по уровням во всех случаях его определения (локализация двумя микрофонными антеннами + сравнительный анализ уровня модельного диполя с экспериментальными точками для антисимметричной моды, полученными 2-микрофонной решеткой для азимутального разложения звукового поля) не превышает 3 дБ. Минимизация данного значения может быть получена путем снижения погрешности несоответствия теоретических и реальных координат при установке микрофонов в решетку, а также путем обеспечения тщательного контроля параллельности плоскости наблюдения, содержащей объект исследований, с плоскостью установки антенны. В случае использования дипольно-настроенной антенны также необходимо обеспечивать размещение объекта для генерации предполагаемого диполя как можно ближе к центру карты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными в диссертационной работе задачами, 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. Реализованная целевая функция показывает высокую чувствительность уровней боковых лепестков в зависимости 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 выгодно отличают разработанную особенности антенну от аналогичных продуктов мировых производителей, позволяя использовать ее в научных исследованиях по верификации новых алгоритмов настройки плоских микрофонных антенн с целью повышения качества локализации путем тестирования оптимального набора расположения микрофонов В экспериментальных условиях.

обеспечения настройки пост-обработки Для тонкой записанных акустических сигналов, выполнена разработка собственного программного обеспечения, которое демонстрирует сопоставимый с проприетарным программным продуктом Bruel & Kjaer 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 высокоэффективной реализации монопольной настройки ключевым для 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 Bruel & Kjaer, что выражается в более компактной области локализации звуковых источников на карте, особенно на низких частотах.

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-индцуируемого звукового поля показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными, полученными

117

другими исследователями, и может быть использовано для валидации и отладки реализованного дипольного алгоритма пост-обработки.

Подтверждено, что использование взаимно-перпендикулярных ориентаций установки цилиндрического стержня относительно плоскости размещения антенны позволяет провести дополнительный контроль интенсивности излучения локализуемого диполя с помощью традиционного монопольного алгоритма постобработки Conventional Beamforming, что подтверждается как в вычислительном, так и натурном эксперименте.

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.

Выявлено, что максимальное расхождение по уровням звукового давления диполей во всех случаях его определения не превышает 3 дБ. Минимизация данного значения может быть получена путем снижения погрешности несоответствия теоретических и реальных координат при установке микрофонов в решетку, а также путем обеспечения тщательного контроля параллельности плоскости наблюдения с плоскостью установки антенны. В случае использования дипольно-настроенной антенны также необходимо обеспечивать размещение объекта для генерации диполя в центре карты локализации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Том 1. Авиационный шум. Международные стандарты и Рекомендуемая практика. Издание восьмое. Монреаль: ИКАО, 2017.

2. Копьев В.Ф., Мунин А.Г., Остриков Н.Н. Проблемы создания перспективных магистральных самолетов, способных удовлетворять нормам ИКАО по шуму на местности // Труды ЦАГИ. 2014. Вып. 2739. С. 3-13.

3. Zaytsev M.Y., Kopiev V.F, Velichko S.A., Belyaev I.V. Fly-over noise source localization during acoustic flight tests of advanced passenger aircraft // AIAA 2019-2426.

4. Самохин В.Ф., Маслова Н.П. Метод оценки минимального уровня шума на местности самолета при заходе на посадку // Сборник тезисов Пятой открытой всероссийской (XVII научно-технической) конференция по аэроакустике, Москва, 25-29 сентября 2017 г. С. 51.

5. Голдстейн М.Е. Аэроакустика. М.: Машиностроение, 1981. 294 с.

6. Мунин А.Г. Авиационная акустика. Часть 1. М.: Машиностроение, 1986. 244 с.

7. Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound // Proceedings of The Royal Society A. 1955. Vol. 231. P. 505-514.

8. Johnson D.H., Dudgeon D.E. Array Signal Processing: Concepts and Techniques. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 537 p.

9. Christensen J.J., Hald J. Beamforming. Technical review // Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurements A/S, Denmark, Nærum, 2004. 48 p.

 Sarradj E. Optimal planar microphone array arrangements // Proceedings of the Deutsche Jahrestagung fur Akustik (DAGA), Nurnberg, Germany, 2015.
 P. 220-223.

11. Ershov V.V., Palchikovskiy V.V. Designing planar microphone array for sound source localization // Journal Akustika. 2019. Vol. 32. P. 123-129.

12. 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, Iss. 1.

13. Jordan P., Fitzpatrick J., Valiere J. Measurement of an aeroacoustic dipole using a linear microphone array // The Journal of the Acoustical Society of America. 2002. Vol. 111, No. 3. P. 1267-1273.

14. Liu Y., Quayle A., Dowling A., Sijtsma P. Beamforming correction for dipole measurement using two-dimensional microphone arrays // The Journal of Acoustical Society of America. 2008. Vol. 124, No. 1. P. 182-191.

15. АкустическаякамераАК-2:[сайт].URL:http://www.tsagi.ru/experimental\_base/akusticheskaya-kamera-ak-2/(дата обращения20.04.2022).

16. И.В., Голубев А.Ю., Зверев А.Я., С.Ю., Беляев Макашов B.B., Соболев Черных Пальчиковский A.Φ., B.B. Экспериментальное исследование звукопоглощения акустических клиньев для заглушенных камер // Акустический журнал. 2015. Т. 61, № 5. С. 636-644.

17. Бычков О.П., Демьянов М.А., Фараносов Г.А. Локализация дипольных источников шума плоскими микрофонными решетками // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 675-687.

18. Demyanov M., Bychkov O., Faranosov G., Zaytsev M. Development of beamforming methods for uncorrelated dipole sources // Proceedings of the 7th Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2018.

19. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Котова А.Н. Представление звукового поля турбулентного вихревого кольца суперпозицией квадруполей // Акустический журнал. 2001. Т. 47, № 6. С. 793-801.

20. Копьев В.Ф., Шур М.Л. Азимутальные компоненты звукового поля турбулентной струи: результаты измерений и их использование для валидации современных методов расчета шума // Ученые записки ЦАГИ. 2010. Т. 41, № 1. С. 5-12.

21. Faranosov G.A., Kopiev V.F. Localization of sound sources by means of ADT data interpretation improved by refraction effect consideration // AIAA 2009-3215.

22. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф. Механизм излучения звука турбулентностью вблизи твердого тела // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 1. С. 98-109.

23. Bychkov O., Faranosov G., Denisov S., Ostrikov N. Theoretical modeling of the excess noise due to jet-wing interaction // AIAA 2016-2932.

24. Suzuki T. L1 generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources // Journal of Sound & Vibration. 2011. Vol. 330, Iss. 24. P. 5835-5851.

Mueller T.J. Aeroacoustic Measurements. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
 320 p.

26. Yardibi T., Lia J., Stoica P., Zawodny N.S., Cattafesta L. N. A covariance fitting approach for correlated acoustic source mapping // The Journal of the Acoustical Society of America. 2010. Vol. 127, Iss. 5. P. 2920-2931.

27. Sijtsma P. CLEAN Based on Spatial Source Coherence // AIAA 2007-3436.

28. Sijtsma P., Snellen M. High-Resolution CLEAN-SC // Proceedings of the 6th Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2016.

29. Sijtsma P., Merino-Martinez R., Malgoezar A., Snellen M. High-resolution CLEAN-SC: Theory and experimental validation // International Journal of Aeroacoustics. 2017. Vol. 16, Iss. 4-5. P. 274-298.

30. Steinhardt A., Van Veen B. Adaptive beamforming // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 1989. Vol. 3. P. 253-281.

31. Huanga X., Bai L., Vinogradov I. Peers E. Adaptive beamforming for array signal processing in aeroacoustic measurements // The Journal of the Acoustical Society of America. 2012. Vol. 131, Iss. 3. P. 2152-2161.

32. Brooks T.F., Humphreys W.M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 294, Iss. 4-5. P. 856-879.

33. Brooks T.F., Humphreys W.M. Extension of DAMAS phased array processing for spatial coherence determination (DAMAS-C) // AIAA 2006-2654.

34. Dougherty R.P. Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming // AIAA 2005-2961.

35. Zavala P., Roeck W., Janssens K., Arruda J., Sas P., Desmet W. Monopole and Dipole Identification Using Generalized Inverse Beamforming // AIAA 2010-3740.

36. Hald J., Christensen J.J. A class of optimal broadband phased array geometries designed for easy construction // Proceedings of the 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2002), Dearborn, MI, USA, 2002.

37. Hald J. Combined NAH and beamforming using the same array // Journal of Sound & Vibration. 2005. Vol. 1, Iss. 12. P. 11-39.

38. Malgoezar A., Snellen M., Sijtsma P., Simons D. Improving beamforming by optimization of acoustic array microphone positions // Proceedings of the 6th Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2016.

39. Dougherty R.P., Stoker R.W. Sidelobe suppression for phased array aeroacoustic measurements // AIAA 98-2242.

40. Ассамблея 39-й сессии Международной Организации Гражданской Авиации. Протоколы пленарных заседаний. Монреаль: ИКАО, 2017. 77 с.

41. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 720 с.

42. Мунин А.Г., Науменко З.Н. Звуковая мощность, создаваемая участками дозвуковой струи // Ученые записки ЦАГИ. 1970. Т. 1, № 5. С. 29-38.

43. Халецкий Ю.Д. Некоторые тенденции современной аэроакустики // Авиационные двигатели. 2020. № 3. С. 69-81.

44. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. I. General theory // Proc. R. Soc. Lond. A. 1952. Vol. 211, Iss. 1107. P. 564-587.

45. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies // Journal AerospaceLab. 2014. Iss. 7. P. 1-15.

46. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов (обзор) // Акустический журнал. 2003. Т. 49, № 3. С. 293-317.

47. Кузнецов В.М., Мунин А.Г. Проблемы борьбы с шумом летательных аппаратов // Труды ЦАГИ. 1999. Вып. 2634. С. 14-18.

48. Кузнецов В.М., Мунин А.Г. Авиационная акустика. Энциклопедия. Раздел 4. М.: Машиностроение, 2002. С. 701-726.

49. Кузнецов В.М. Эффективность методов снижения шума реактивных струй пассажирских самолетов // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 1. С. 91-102.

50. Breen N.P., Ahuja K.K. Jet noise source location by acoustic beamforming and near field sound contours – a comparison // AIAA 2017-3858.

51. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н. Снижение шума дозвуковой струи за счет гофрированной формы сопла // Акустический журнал. 2013. Т. 59, № 2. С. 232-234.

52. Lee S.S., Bridges J. Phased-array study of dual-flow jet noise – effect of nozzles and mixers // AIAA 2006-2647.

53. Соболев А.Ф. О повышении затухания звука в канале с облицовкой локально-реагирующего типа при наличии потока // Акустический журнал. 1994.
 Т. 40, № 5. С. 837-843.

54. Соболев А.Ф. Повышение эффективности снижения шума в канале с потоком при наличии звукопоглощающих облицовок // Акустический журнал. 1999. Т. 45, №3. С. 404-413.

55. Леонтьев А.С., Маслова Э.Г., Смирнов В.Т., Соболев А.Ф. Исследования по повышению эффективности системы шумоглушения в канале наружного контура авиационного двигателя // Техническая акустика. 1993. Т. 2, Вып. 2(4). С. 37- 42.

56. Соболев А.Ф., Маслова Э.Г. Увеличение эффективности звукопоглощающих конструкций с целью снижения шума самолета на местности // Техника воздушного флота. 1992. № 1-3. С. 26-33.

57. Thomas R.H., Mengle V.G., Brunsniak L., Elkoby R. Reducing propulsion airframe aeroacoustic interactions with uniquely tailored chevrons. 3. Jet-Flap Interaction // AIAA 2006-2435.

58. Jente C., Pott-Pollenske M., Boenke C., Buescher A., Goldhahn I. Experimental Investigation of Jet-Flap-Interaction Noise Sensitivity due to varying flap parameters at a UHBR Engine/High-Lift-Wing installation // AIAA 2018-3788.

59. Zhang Y., Lin D., Yang Z., Lee I. Investigation of installation effect of jet noise from turbofan engines // Proceedings of the 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2019), 2019, Madrid, Spain. P. 3115-3126.

60. Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А. Исследование влияния угла отклонения закрылка на шум взаимодействия двухконтурной струи и стреловидного крыла в спутном потоке // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 1. С. 17-29.

61. Ishii Y., Hald J., Ishii T., Oinuma H., Nagai K., Yokokawa Y., Yamamoto K. High-resolution fly-over beamforming using a small practical array // Proceedings of the 5th Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2014.

62. Bahr C.J., Humphreys W.M., Ernst D., Ahlefeldt T., Spehr C., Pereira A., Leclère Q., Picard C., Porteous R., Moreau D., Fischer J.R., Doolan C.J. A comparison of microphone phased array methods applied to the study of airframe noise in wind tunnel testing // AIAA 2017-3718.

63. Копьев В.Ф., Храмцов 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.

64. Wal H.V.D., Sijtsma P. Source localization techniques with acoustic arrays at NLR // National Aerospace Laboratory (NLR). 2009. Report. No. NLR-TP-2009-200.
6 p.

65. Gade S., Hald J., Gomes J., Dirks G., Ginn B. Recent advances in movingsource beamforming // Journal of Sound and Vibration. 2015. Vol. 49, Iss. 4. P. 8-14.

66. Ginn B., Gomes J., Hald J. Recent advances in rail vehicle moving source beamforming // Proceedings of the 42th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2013), 2013, Innsbruck, Austria.

67. Fonseca W., Gerges S. Development of a low cost system for pass-by noise beamforming measurements // Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, Sydney, Australia, 2010.

68. Beamforming – Microphone Array Sound Localization: [сайт]. URL: www.bksv.com/en/knowledge/applications/noise-source-identification/beamforming (дата обращения 20.04.2022).

69. Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храмцов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 1. С. 114-126.

70. Palchikovskiy V.V., Bersenev Yu.V., Makashov S.Yu., Belyaev I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. Tests of anechoic chamber for aeroacoustics investigations // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770, № 030116.

71. 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, № 012032.

72. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Bersenev Yu.V., Makashov S.Yu., Belyaev I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU // Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. P. 264-272.

73. Храмцов И.В., Пальчиковский В.В., Шаврина Е.В. Выбор размещения системы отвода воздушной струи в заглушенной камере // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 142-144.

74. 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 & Technology. 2018. № 7. P. 119-123.

75. Ершов В.В. Верификация алгоритмов идентификации положения источников звука // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 6. С. 105-108.

76. Benesty J., Chen J., Huang Y. Microphone Array Signal Processing. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 280 p.

77. Lylloff O., Fernandez-Grande E., Agerkvist F., Hald J., Tiana-Roig E., Andersen M. Improving the efficiency of deconvolution algorithms for sound source localization // The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 138, Iss. 1. 2015.

78. Dougherty R.P. Advanced time-domain beamforming techniques // AIAA 2004-2955.

79. Malgoezar A., Snellen M., Simons D., Sijtsma P. Using global optimization methods for acoustic source localization // Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration, Athens, Greece, 2016.

80. Prime Z., Mimani A., Moreau D.J., Doolan C.J. An experimental comparison of beamforming, time-reversal and near-field acoustic holography for aeroacoustic source localization // AIAA 2014-2917.

81. Porteous R., Prime Z., Valeau V., Doolan C., Moreau D. Three-dimensional beamforming of aeroacoustic sources // Proceedings of the 43rd International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2014), 2014, Melbourne, Australia.

82. Hald J., Christensen J.J. A novel beamformer array design for noise source location from intermediate measurement distances // The Journal of the Acoustical Society of America. 2002. Vol. 112, No. 5.

83. Arcondoulis E.J.G., Doolan C.J., Brooks L.A., Zander A.C. A modification to logarithmic spiral beamforming arrays for aeroacoustic applications // AIAA 2011-2720.

84. Демьянов В.Ф., Малоземов В.Н. Введение в минимакс. М.: Наука, 1972. 368 с.

85. Lashi D., Quevy Q., Lemeire J. Optimizing microphone arrays for delayand-sum beamforming using genetic algorithms // Proceedings of the 4th International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications (Cloudtech), Brussels, Belgium, 2018.

86. Soltankarimi F., Nourinia J., Ghobadi Ch. Side lobe level optimization in phased array antennas using Genetic Algorithm // Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications – Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No.04TH8738), 2004. P. 389-394.

87. Gerstofta P., Hodgkiss W. Improving beampatterns of two-dimensional random arrays using convex optimization // The Journal of the Acoustical Society of America. 2011. Vol. 129, Iss. 4. P. 135-140.

88. Bai M., Lin J., Liu K. Optimized microphone deployment for near-field acoustic holography: To be, or not to be random, that is the question // Journal of Sound and Vibration. 2010. Vol. 329, Iss. 14. P. 2809-2824.

89. Li M., Wei L., Fu Q., Yang D. Ghost image suppression based on particle swarm optimization-MVDR in sound field reconstruction // Journal of Vibration and Acoustics. 2015. Vol. 137, Iss. 3. P. 031007.

90. Prime Z., Doolan C., Zajamsek B. Beamforming array optimisation and phase averaged sound source mapping on a model wind turbine // Proceedings of the 43rd International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2014), 2014, Melbourne, Australia.

91. Ершов В.В. Сравнение методов оптимизации расположения микрофонов в кольцевой микрофонной антенне // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015: материалы XVI Всерос. науч.-техн. конф., 2015, Пермь, Россия. С. 285-288.

92. Ершов В.В. Проектирование конструкции лучевой микрофонной антенны с возможностью быстрой перенастройки её конфигурации // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 11. С. 20-23.

93. Sijtsma P. Experimental techniques for identification and characterisation of noise sources // National Aerospace Laboratory (NLR). 2004. Report No. NLR-TP-2004-165. 47 p.

94. Dougherty R.P., Ramachandran R.C., Raman G. Deconvolution of sources in aeroacoustic images from phased microphone arrays using linear programming // International Journal of Aeroacoustics. 2013. Vol. 12, Iss. 7-8. P. 699-717.

95. Chu Z., Yang Y., Shen L., Ping G. Enhancement of two-dimensional acoustic source identification with Fourier-based deconvolution beamforming // Journal of Vibroengineering. 2016. Vol. 18, Iss. 5. P. 3337-3361.

96. Chu Z., Yang Y. Comparison of deconvolution methods for the visualization of acoustic sources based on cross-spectral imaging function beamforming // Mechanical Systems and Signal Processing. 2014. Vol. 48, Iss. 1-2. P. 404-422.

97. Fernandez Comesana D., Fernandez Grande E., Tiana Roig E., Holland K.R. A novel deconvolution beamforming algorithm for virtual phased arrays // Proceedings of the 42th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2013), 2013, Innsbruck, Austria.

98. Bahr C., Zawodny N., Bertolucci B., Woolwine K., Liu F., Li J., Sheplak M., Cattafesta L. Measurement of phased array point spread functions for use with beamforming // AIAA 2011-2767.

99. Tiana-Roig E., Jacobsen F. Deconvolution for the localization of sound sources using a circular microphone array // The Journal of Acoustical Society of America. 2013. Vol. 134, Iss. 3. P. 2078-2089.

100. Рандалл Р.Б. Частотный анализ. Дания, Глоструп: К. Ларсен и сын, 1989. 390 с.

101. 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 // Proceedings of the 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2020, Samara, Russia.

102. 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 //

Proceedings of the 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2020, Samara, Russia.

103. Скучик Е. Основы акустики: в 2 т. М.: Мир, 1976. Т. 1. 520 с.

104. Dougherty R.P. Cross Spectral Matrix diagonal optimization // Proceedings of the 6th Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2016.

105. Зверев В.А. Радиооптика (преобразования сигналов в радио и оптике).М.: Сов. радио, 1975. 304 с.

106. Khramtsov I., Cherenkova E., Palchikovskiy V., Kustov O. On applicability of additive technology in producing nozles for jet noise investigations // Journal Akustika. 2019. Vol. 34. P. 182-187.

107. Khramtsov I.V., Cherenkova E.S., Palchikovskiy V.V., Kustov O.Yu. On application in aeroacoustic investigations of nozzles produced by additive technology // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2027, Iss. 1.

108. Храмцов И.В., Черенкова Е.С., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю. Снижение шума турбулентной дозвуковой струи с помощью шевронных насадков // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2017: материалы XVIII Всерос. науч.-техн. конф., 2017, Пермь, Россия. С. 285-288.

109. Breen N.P., Ahuja K.K. Measuring jet noise source locations with acoustic beamforming // AIAA 2015-0735.

110. Liu Y., Dowling A.P., Quayle A.R. Numerical simulation of beamforming correction for dipole source identification // Proceedings of the 2nd Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2008.

111. Porteous R., Prime Z., Doolan C.J., Moreau D.J., Valeau V. Threedimensional beamforming of dipolar aeroacoustic sources // Journal of Sound and Vibration. 2015. Vol. 355. P. 117-134.

112. Oudompheng B., Pereira A., Picard C., Lecl'ere Q., Nicolas B. A theoretical and experimental comparison of the iterative equivalent source method and the generalized inverse beamforming // Proceedings of the 5th Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2014.

113. Kopiev V., Zaitsev M., Karavosov R. Experimental investigation of azimuthal structure of dipole noise for rigid cylinder inserted in turbulent jet // AIAA 2004-2927.

114. Boudet J., Casalino D., Jacob M.C., Ferrand P. Prediction of sound radiated by a rod using large eddy simulation // AIAA 2003-3217.

115. Ffowcs Williams J.E., Hawkings D.L. Sound generated by turbulence and surface in arbitrary motion // Philosophical Transactions of the Royal Society of London 264A. 1969. P. 321-342.

116. Усанин М.В. Применение акустической аналогии для расчета звука в дальнем поле // Вестник ПНИПУ. Механика. 2004. № 12. С. 101-109.

117. Zhao Q. Sound source localization of flow around circular cylinder by a virtual microphone array technique // AIP Advances. 2018. № 8.

118. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 184 с.

119. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. М.: Мир, 1980. 536 с.

120. Исакович М. А. Общая акустика. Часть 1. М.: Наука, 1973. 496 с.

121. Ershov V., Khramtsov I., Kustov O. Determination of monopole and dipole sources of flow around a cylinder using a virtual microphone array // Journal Akustika. 2021. Vol. 39. P. 78-83.

122. Lopez C. MATLAB Optimization Techniques. Berlin: Springer-Verlag, 2015. 292 p.

123. Бычков О.П., Фараносов Г.А. Анализ взаимной связи модовой структуры пульсаций ближнего поля струи и шума взаимодействия струи и крыла // Акустический журнал. 2020. Т. 66, № 1. С. 34-45.