

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «АКИН»

А.В. Мальцев

11 2022 г.

М.п.



## ОТЗЫВ

ведущей организации

по диссертационной работе Ершова Виктора Валерьевича

«Разработка новых алгоритмов настройки плоских микрофонных антенн для эффективной локализации источников звука монопольного и дипольного типа», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – «Акустика».

Работа посвящена **актуальной** для гражданского авиастроения проблеме локализации источников шума обтекания. Для разработки эффективных средств подавления шума необходимо иметь информацию о распределении акустических источников в пространстве и об интенсивности их излучения. Одним из способов получения данной информации является проведение акустических измерений с помощью микрофонных фазированных решеток. Этот метод позволяет на основе синхронной многоканальной записи и пост-обработки регистрируемых сигналов дистанционно визуализировать источники шума в широкой полосе частот. Традиционно, в основе алгоритма обработки лежит предположение о монопольности источников. В то же время, аэродинамические источники, находящиеся на обтекаемых потоком поверхностях, как правило, являются диполями. Настоящая работа посвящена расширению известных методов обработки для учета именно дипольной структуры элементарных аэродинамических источников.

В начале (глава 1) проведен подробный анализ современной литературы, посвященной применению антенных решеток. Проанализированы методы

обработки первичных сигналов, с помощью которых можно определить положение, уровень звукового сигнала и частоту источника (Conventional Beamforming, Cross-Spectral Beamforming, DAMAS), приведены основные расчетные формулы, лежащие в основе рабочих алгоритмов. Выявлен недостаточно проработанный пункт, относящийся к выбору расположения микрофонов в решетке. Проведен численный эксперимент, по результатам которого предложено оптимальное расположение микрофонов.

Далее (глава 2) проведена разработка собственного программного обеспечения в пакете Matlab, аналогичного фирменному продукту B&K, но с расширенным функционалом, отсутствующим там. Проведена оценка качества локализации источников шума с помощью существующих методов для принятия решения о целесообразности их реализации в программном коде. Подробно описаны все модули разработанной программы. Реализована возможность выбора различных алгоритмов пост-обработки первичных звуковых сигналов. Оптимизирована скорость вычислительных операций. Тестовые эксперименты показали, что разработанный в диссертации алгоритм не уступает ни по точности, ни по быстродействию фирменному алгоритму B&K.

Выполнено проектирование и создание универсальной конструкции микрофонной антенны с возможностью внесения конструктивных изменений в зависимости от условий проведения эксперимента. Дано подробное описание процедуры конструирования, основных элементов конструкции, возможностей ее модификации.

Глава 3 посвящена алгоритмам пост-обработки и математической модели для настройки микрофонной антенны для получения наилучшего качества локализации звуковых источников монопольного типа. Приведена структура алгоритма, основные расчетные формулы, на которых основан алгоритм. Оптимизирована настройка антенны. Тщательно описана экспериментальная установка и условия проведения экспериментов в акустической заглушенной камере. Экспериментально исследована двумя

антенными решетками – фирменной В&К и разработанной в диссертации, локализация эталонных монополюсных источников звука – тональных пьезоизлучателей. Показано, что пятна локализации, получаемые разработанной антенной заметно меньше чем у антенны В&К. При этом уровни звукового давления отличаются не более чем на 3 дБ. Измерены, также двумя антеннами шум струи в разных частотных полосах, Здесь заметных различий между качеством визуализации не обнаружено.

В главе 4 разработан и исследован метод проведения настройки микрофонной антенны на локализацию дипольных источников. Подробно описан алгоритм обработки, скорректированный с учетом дипольной природы источников шума – направленности излучения диполей. Первичная отладка программы проведена в численном эксперименте. Уже на уровне численного эксперимента продемонстрирована некорректность обработки данных монополюсным алгоритмом. Проведены экспериментальные исследования локализации источников шума дипольного типа – поля обтекания цилиндра и тонкой пластины. Проведен сравнительный анализ полученных карт локализации с картами, полученными с помощью антенны, настроенной традиционным образом – на монополюсные источники. Наконец, проведен еще один численный эксперимент, в котором в качестве источника использовался поток, обтекающий цилиндр. Для нахождения нестационарных полей около цилиндра использован газодинамический пакет ANSYS Fluent. Шум в дальнем поле рассчитывается с помощью акустической аналогии Фокс Вильямса – Хоукинга. Соответственно, визуализация источника звука проводилась виртуальной регистрирующей антенной с применением дипольного алгоритма. Результаты расчетов сопоставлены с соответствующими результатами независимого тестового физического эксперимента, проведенного ранее. Демонстрация высокого качества расчетов показана на рисунке 34 (стр. 85). В целом, верификация численной модели, проведенной таким сквозным численным методом, показала правильность использованных алгоритмов.

Далее в этой главе изложена процедура построения математической модели и алгоритмов настройки микрофонной антенны на источники дипольного типа. Оценка параметров настраиваемой микрофонной антенны проводится на основе минимизации максимального уровня боковых лепестков, которая берется напрямую с карты локализации дипольного источника.

В заключительной части главы 4 представлены финальные экспериментальные результаты по визуализации аэродинамических источников звука, возникающих при обтекании цилиндра и задней кромки пластины (рис. 54 – 56).

Подводя итог рассмотрению диссертации, сформулируем основные конкретные результаты, полученные в ней и обладающие **новизной**:

1. Сконструирована и создана новая микрофонная антенна, с возможностью изменять число микрофонов и их положение, что позволило экспериментально верифицировать расчетные методы оптимальной настройки антенн на локализацию источников звука монопольного и дипольного типа.
2. Создана математическая модель для нахождения оптимального расположения на плоскости заданного числа микрофонов с заданной апертурой. с целью повышения эффективности проведения измерений источников звука монопольного и дипольного типа.
3. Написаны несколько алгоритмов обработки экспериментальных данных для построения карт локализации звуковых источников монопольного и дипольного типа. Проведена верификация работоспособности этих алгоритмов на модельных монопольных и дипольных звуковых источниках посредством проведения виртуальных экспериментов.
4. Проведены натурные эксперименты по локализации источников звука дипольного типа, возникающих при взаимодействии дозвукового

турбулентного потока с твердыми телами различной конфигурации, с применением разработанной антенны и новых алгоритмов обработки.

5. Проведено тщательное сопоставление результатов экспериментов, полученных по известным схемам настройки микрофонных антенн, с результатами, полученными с применением разработанного в диссертации метода. Показано заметное преимущество последнего.

6. Результатом проведенных разработок и исследований является готовый к применению в аэроакустических исследованиях эффективный инструмент.

**Практическая значимость** состоит в создании измерительного комплекса, пригодного для практических исследований взаимодействия турбулентного потока с элементами планера: шума стоек шасси, кромочного шума. Эти исследования необходимы для выбора схем компоновки элементов планера, уменьшающих шум обтекания. Возможность настройки антенны применительно к конкретным условиям измерений, обеспечивает высокое качество локализации. Вся система, безусловно, может быть использована в рамках импортозамещения зарубежного оборудования и программных средств.

Следует отметить высокий общий уровень работы и тщательность контроля получаемых результатов. Результаты обработки сигналов сравниваются с данными, полученными в аналогичных отечественных и зарубежных исследованиях. В частности, верификация программного кода проведена путем сравнения с известной программой фирмы Brüel & Kjaer (в качестве эффективного примера можно привести рисунок 1 автореферата).

**Личный вклад соискателя** в полученные результаты четко обозначен. Разработка, реализация и валидация представленных методов настройки микрофонных антенн, написание, отладка и оформление программного кода, пост-обработка результатов акустических измерений, а также постановка условий проведения экспериментальных исследований, были выполнены автором лично. Доля автора диссертации в представленных исследованиях составляет от 30% до 90%, в статьях в соавторстве составляет от 10% до 80%.

## **Рекомендации по использованию**

Созданная антенная решетка и пакеты программ являются готовым инструментом для исследований различных источников аэродинамического шума. Представляется, что здесь возможно тиражирование этой системы и ее коммерческое использование. Вместе с этим, развитые численные методы обработки могут использоваться для дальнейшего совершенствования различных фазированных антенн, не только аэро-, но и гидроакустических. Результаты работы можно рекомендовать для использования в ЦАГИ, ЦИАМ, СПб политехнический университет им. Петра Великого, АО «АКИН», АО Концерн «Океанприбор», ТОИ ДВНЦ.

### **Замечания:**

1. стр.17 – «уменьшение уровня шума на 75%» - что это означает. Уровень шума это дБ.
2. стр. 31, формула для спектра давления - Размерность неправильная - в знаменателе длина. Ее нужно чем-то компенсировать в числителе.
3. стр.55 - Что такое амплитуда звукового источника? Это что-то вроде давления, приведенного к некоторому небольшому расстоянию около источника?
4. стр.58, формула (5) - непонятная формула - какая-то описка
4. стр.68 – неясно, что можно ожидать при использовании отечественных микрофонов? Есть ли возможность выравнивать АЧХ цифровым образом?
5. стр.75, о «разрыхлении» начального участка струи - не менее коротким, а более коротким

## **Заключение**

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.7. – «Акустика». Диссертационная работа В.В. Ершова содержит подробное, последовательное и ясное изложение поставленных проблем и их конструктивных решений. Она содержит обсуждение большого числа



современных работ и четкое формулирование новых результатов, полученных автором. Разработанные методы и результаты доведены до конечной конструкции и пакетов программ, полностью протестированных и работоспособных.

Основные результаты доложены на 12 конференциях, опубликованы в 20 научных работах, рекомендованных ВАК и регистрируемых в Scopus и WoS. Разработанная программа для обработки сигналов на ЭВМ официально зарегистрирована.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Степень личного участия автора в коллективных работах формулируется правильно.

Диссертация В.В. Ершова является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблемы создания алгоритмов настройки плоских антенн для локализации монополюсных и дипольных акустических источников. Работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842), предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Ершов Виктор Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – «Акустика».

Отзыв на диссертацию обсужден на семинаре Теоретического отдела АО «АКИН» 01.11.2022 г.

Отзыв составил

Миронов Михаил Арсеньевич,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, Москва, 117292,  
ул. Шверника 4. Тел. +7 9067595040,  
mail: [mironov\\_ma@mail.ru](mailto:mironov_ma@mail.ru)

