

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию
Плаксина Глеба Максимовича
на тему «Метод численного бимформинга
в вычислительном эксперименте в аэроакустике»
по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа посвящена математическому моделированию, разработке численных методов и прикладного программного обеспечения для решения обратной задачи по идентификации акустических источников по данным вычислительного эксперимента (CFD-моделирования) турбулентного обтекания летательных аппаратов.

Актуальность избранной темы. Проблема авиационного шума приобретает всё большую остроту в связи с ужесточением норм ИКАО и необходимостью снижения шумового воздействия на население. Существующие методы бимформинга ориентированы на обработку данных физических экспериментов с ограниченным числом микрофонов и не в полной мере используют преимущества вычислительного эксперимента, такие как возможность размещения произвольного количества виртуальных микрофонов в любых конфигурациях. Разработка специализированного подхода – численного бимформинга – является актуальной научно-технической задачей, имеющей практическое значение для проектирования малозумных летательных аппаратов. Тематика исследования полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Общая методология и методика исследований. В основе работы лежит теория обратных задач для уравнения Гельмгольца в подвижной среде. Автор формулирует обратную задачу восстановления плотности простого слоя (монопольный источник) или плотностей простого и двойного слоя (дипольный/смешанный источник) по известному акустическому полю на поверхности расположения микрофонов. Для дискретизации используется конечно-элементное представление функции источника с кусочно-линейными базисными функциями. Вычисление элементов матрицы переноса излучения выполняется с помощью квадратур/кубатур Гаусса. Решение сводится к задаче наименьших квадратов, решаемой прямыми или итерационными методами (сопряжённые градиенты). Для обеспечения устойчивости без явной регуляризации предложен способ выбора параметров дискретизации (шаги сеток источника и микрофонов, расстояние между

ними), основанный на физических соображениях (дифракционный предел, различимость сигналов). Метод реализован в программном модуле NumBeamForm комплекса NOISEtte на C++ с поддержкой MPI, OpenMP и OpenCL. Верификация проведена на синтетических тестах, валидация – на задаче обтекания сегмента крыла ЗОР30N (сравнение с экспериментальным бимформингом) и на задаче обтекания крыла модели сверхзвукового пассажирского самолёта (сравнение с прямым расчётом по акустической аналогии FWH и анализом ближнего поля).

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность результатов обеспечивается: строгой математической постановкой обратной задачи; успешным тестированием на синтетических данных с восстановлением эталонных функций источника (гауссианы, кусочно-линейные функции) с высокой точностью (относительная погрешность единицы процентов); сравнением результатов численного бимформинга с данными натурального бимформинга для профиля ЗОР30N, показавшим хорошее согласование по локализации основного источника на предкрылке; сопоставлением с прямыми методами (акустическая аналогия FWH) для крыла сверхзвукового самолёта: спектры давления в контрольных точках, вычисленные от найденных источников, хорошо воспроизводят спектры, полученные прямым методом; согласием локализации источников с физическими представлениями (задняя кромка крыла, щели механизации). Выводы логически вытекают из представленных результатов, обоснованность не вызывает сомнений.

Научная новизна полученных результатов. Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Впервые разработана математическая модель распределённого акустического источника, допускающая корреляцию излучения, в отличие от традиционных моделей натурального бимформинга, основанных на предположении о некоррелированности точечных источников. Модель адаптирована к данным вычислительного эксперимента.

2. Предложен новый комплексный способ дискретизации, включающий численный метод и ограничения на геометрические параметры (шаги сеток, расстояния), позволяющие получать устойчивые решения без явной регуляризации. Установлены диапазоны коэффициентов для одномерного и двумерного случаев.

3. Впервые получены результаты идентификации акустических источников на крыле модели прототипа сверхзвукового пассажирского самолёта на режиме посадки по данным вихререшающего

суперкомпьютерного моделирования. Показано, что основные источники локализованы вдоль задней кромки крыла.

Ценность для науки и практики полученных автором результатов. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный метод позволяет получать количественные оценки локализации и интенсивности акустических источников на этапе проектирования летательных аппаратов по результатам CFD-расчётов. Это даёт возможность оптимизировать конструкцию для снижения шума без дорогостоящих натурных испытаний. Программная реализация метода в составе комплекса NOISEtte (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ) готова к использованию в научных и промышленных организациях, занимающихся аэроакустикой. Результаты по крылу сверхзвукового самолёта могут быть полезны при проектировании реального прототипа. Научная ценность заключается в развитии теории обратных задач для уравнения Гельмгольца применительно к аэроакустическим данным большого объёма, а также в разработке неявного регуляризирующего подхода на основе выбора параметров дискретизации.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Модуль NumBeamForm рекомендуется использовать при проведении вычислительных экспериментов по обтеканию летательных аппаратов для выявления доминирующих акустических источников. Предложенные ограничения на параметры дискретизации могут служить практическим руководством для построения сеток источника и микрофонных решёток при заданной частоте. Результаты идентификации источников на крыле модели СПС полезны для дальнейшей оптимизации геометрии крыла с целью снижения шума на посадке. Метод может быть распространён на другие классы задач, где требуется восстановление распределённых источников по данным волнового поля (например, в гидроакустике, дефектоскопии).

Общая оценка содержания диссертации и завершённость. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Содержание полностью раскрывает тему исследования. Первая глава содержит постановку прямой и обратной задач. Во второй главе разработан численный метод, проведён выбор параметров дискретизации и выполнено тестирование на синтетических данных. Третья глава описывает программную реализацию и параллельные алгоритмы. В четвёртой главе метод верифицирован на промышленно-ориентированной задаче обтекания крыла 30P30N. Пятая глава посвящена решению прикладной задачи для крыла сверхзвукового пассажирского самолёта. Диссертация является законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне.

Список замечаний по недостаткам в содержании и оформлении диссертации соискателя и прилагаемого к ней автореферата. По итогам анализа работы можно сделать следующие замечания:

1. **Неполная интерпретация регуляризирующих свойств процедуры выбора параметров дискретизации.** Подпараграф 2.1.2 «Выбор параметров дискретизации» по сути представляет собой описание специализированного регуляризирующего алгоритма, который существенно использует априорную информацию об исследуемом объекте. В предложенном подходе роль параметра регуляризации играет набор параметров конфигурации сеток микрофонов и источников. При этом выбор соответствующей конфигурации согласуется с физическими особенностями решаемой задачи: предложен априорный способ определения взаимосвязи между характерными значениями параметров сеток, обеспечивающий получение обоснованного решения. Полученные автором результаты хорошо согласуются с основами теории регуляризации. В частности, при увеличении размеров дискретизации детализация полученного решения будет уменьшаться, а при уменьшении соответствующих размеров будут появляться дополнительные «ложные» детали, связанные с неустойчивостью решения, которые можно ошибочно принять за «истинные». Однако в этом подпараграфе не был затронут вопрос о согласовании параметров сеток с погрешностью задания входных данных. Как хорошо известно из основ теории регуляризации, невозможно построить регуляризирующий алгоритм, в котором выбор параметра регуляризации не был бы согласован с погрешностью задания входных данных. Этот вопрос косвенно рассмотрен позже, а именно в параграфе 2.2 «Тестирование метода для источника монополярного типа на синтетических данных», где описан экспериментальный способ выбора параметра регуляризации (набора параметров конфигурации сеток), который согласует этот выбор с характерными ошибками в соответствующих симулированных измерениях (хотя в работе вопросы об ошибках измерений микрофонами при описании методов по большей части опущены и впервые встречаются только в подпараграфе 4.2.1 «Описание тестовых задач на устойчивость метода для конфигураций сегмента прямого крыла» главы 4, например на стр. 79, то есть под конец работы). Таким образом, автор за счёт выбранной структуры изложения материала неявно преуменьшает значимость своего результата. Следовало бы явно заявить, что предложенный метод является полноценным регуляризирующим алгоритмом, построенным на основе активного использования априорной информации об исследуемом в диссертации объекте, для которого необходимо решать некорректно поставленную задачу (о чём многократно делается акцент во Введении).

2. Немотивированное упоминание значения числа обусловленности.

В подпараграфе 2.1.2 «Выбор параметров дискретизации» делается акцент на том, что предложенный метод способен строить матрицы переноса излучения, число обусловленности которых не превышает 10^5 . Почему выбрана именно эта граница и какие последствия имеет её превышение? Для практики более важна зависимость погрешности решения от уровня шума, а не абсолютная величина числа обусловленности.

3. Различное акцентирование внимания на зашумленности данных в постановках задач. При математической постановке задачи для плотностей простого и двойного слоя делается акцент на зашумленности входных данных (см. постановку задачи (2.19) в подпараграфе 2.3.1 «Задача для плотностей простого и двойного слоя»), однако при постановке задачи для источника монопольного типа упоминание о возможности обработки зашумленных данных делается лишь косвенно (см. постановку задачи (2.6) в подпараграфе 2.1.1 «Построение дискретной модели»). То что данные являются зашумлёнными в постановке (2.6) становится ясно только после изучения постановки задачи (2.19), где поясняются обозначения, аналогичные использованным в постановке (2.6). В частности, в подпараграфе 2.2.3 «Тесты для линии источника при низкой частоте» упоминается, что при отсутствии зашумления данных на микрофонах, полученное решение хорошо приближает точное, но результаты расчётов для зашумленных данных не приводятся. Как уже упоминалось в Замечании 1, знание уровня погрешности задания входных данных критично для получения обоснованного регуляризованного решения задачи. Поэтому отсутствие акцента на обработке зашумленных данных в параграфе 2.1.1 может вызвать неправильно суждение у потенциальных читателей о том, что шумы в данных для решения этой задачи не критичны, хотя метод автора «неявным» образом учитывает шумы в данных, измеряемых микрофонами.

4. Неоднозначность в обсуждении масштабируемости параллельной реализации. В конце параграфа 3.4 «Параллельная реализация» упоминается, что параллельная программная реализация предложенного метода не позволяет исследовать масштабируемость. Из приведённых комментариев непонятно исследование какого типа масштабируемости вызывает проблемы. Упоминание термина масштабируемость подразумевает сильную масштабируемость (сохранение эффективности с ростом числа вычислительных узлов), но из сопровождающего текста складывается впечатление, что автор подразумевает масштабируемость вширь (сохранение эффективности при увеличении сложности задачи для фиксированного числа вычислительных узлов) или даже слабую масштабируемость (сохранение

эффективности при увеличении числа вычислительных узлов и одновременном сохранении объёма работы). Более того, смущает упоминание о сравнительно небольшом числе микрофонов в реальных задачах. Если оно действительно небольшое, то сформулированное в подпараграфе 2.1.2 «Выбор параметров дискретизации» одно из условий применимости предложенного в работе метода, а именно условие (2.12), говорит о том, что и число источников в этом случае будет небольшим. Зачем тогда нужны параллельные вычисления? Таким образом, соответствующее утверждение в конце параграфа 3.4 может сильно запутать потенциальных читателей. Ответ, вероятно, в массовом бимформинге по диапазону частот, где многократно решаются задачи с разными параметрами, однако в тексте это не пояснено. Рекомендуются чётче различать сильную и слабую масштабируемость и указать, что ускорение достигается за счёт независимых расчётов для разных частот.

5. Вопрос о возможности разрешения простого и двойного слоя при расположении микрофонов на двух параллельных плоскостях. В подпараграфе 4.2.4 «Тесты на устойчивость для источника смешанного типа» упоминается, что в том случае, когда источник представим в форме суммы и простого, и двойного слоя, микрофонов, расположенных снизу, недостаточно, и требуется полное окружение ими области источника. Отмечается, что это связано с вопросом корректности предметной постановки задачи — невозможно единственным образом восстановить две функции по результатам наблюдений одной функции (если она измеряется на незамкнутой поверхности). Но можно ли в рамках проведённого исследования сделать утверждение о том, что возможно разрешить простой и двойной слой, если микрофоны расположены под крылом, например, на двух параллельных плоскостях (в рамках рассматриваемых постановок - прямых), что формально даёт наблюдение двух функций? В частности может ли такой подход решить проблему неединственности определения источника при использовании «нижних микрофонов», описанную в подпараграфе 5.3.1 «Идентификация акустических источников на крыле СПС» (стр. 108) Главы 5 «Идентификация распределенного акустического источника на крыле модели прототипа сверхзвукового пассажирского самолета»?

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и носят преимущественно рекомендательный и дискуссионный характер.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации. Автореферат полностью отражает структуру и основные результаты диссертации. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Плаксина Глеба Максимовича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи разработки, верификации и валидации метода численного бимформинга для анализа данных вычислительного эксперимента в аэроакустике, имеющей значение для развития математического моделирования и численных методов в приложении к проблеме снижения авиационного шума, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент



12 мая 2026 г.

Д.В. Лукьяненко

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, прикладной математики, кафедра математики, профессор

Контактные данные:

тел.: +7(495) 939-10-33, e-mail: lukyanenkodv@my.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы:

119992, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 2, физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Тел.: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info.ff@org.msu.ru

И.о. декана физического факультета,
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук,
профессор



В.В. Белокуров