

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ ИМ. А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ИПФ РАН)

На правах рукописи



Кутузов Никита Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ
СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧЕ
ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ВИБРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

1.3.4 – Радиофизика

1.3.7 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Кандидат физико-математических наук
Родионов А.А.

Нижний Новгород – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЕДИНСТВЕННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА 19	
1.1 Постановка задачи локализации виброисточника	20
1.2 Метод максимума правдоподобия в задаче локализации единственного источника	23
1.3 Метод наименьших квадратов в задаче локализации	24
1.4 Экспериментальная апробация и численное моделирование методов локализации единственного виброисточника	26
1.5 Оценка числа вибродатчиков и частотных полос, необходимых для успешной локализации	43
1.6 Реализация процедуры локализации виброисточников в программном обеспечении «CATEC»	45
1.7 Заключение по первой главе	47
ГЛАВА 2. ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ ВИБРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА MUSIC 49	
2.1 Модифицированный метод MUSIC для поиска нескольких виброисточников	50
2.2 Экспериментальная апробация и численное моделирование предложенного алгоритма локализации виброисточников.....	52
2.3 Реализация процедуры локализации нескольких виброисточников в ПО «CATEC»	64
2.4 Заключение по второй главе	65

ГЛАВА 3. ПРОЕКЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИБРОДАТЧИКОВ СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМ РАССОГЛАСОВАНИЕМ МОДЕЛИ И ДРУГИМИ АНОМАЛИЯМИ.....	67
3.1 Аномалии показаний на вибродатчиках и решение обратной задачи.....	67
3.2 Проекционный алгоритм определения аномальных измерений в задаче локализации виброисточников	68
3.3 Условия численного моделирования и экспериментальной апробации	71
3.4 Численное моделирование	72
3.5 Экспериментальная апробация	80
3.6 Сравнение разработанного алгоритма с традиционными методами	82
3.7 Апробация проекционного алгоритма при проведении измерений с использованием микрофонных антенных решеток	85
3.8 Заключение по третьей главе	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	96

Введение

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Задача локализации источников поля является классической для всех типов источников, излучающих волны различной природы. Такая задача возникает, например, в акустике [1–6], в геофизике [7], в приложении к радиоволнам [8] – в том числе радиоастрономии [9], радиолокации [10]. В виброакустике локализация источников повышенной виброактивности – важная задача, возникающая при диагностике и обслуживании конструкций и механизмов. Необходимость локализации источников часто возникает, например, при мониторинге состояния строительных конструкций [11], борьбе с шумом на судах [12], оценке нагрузок на фюзеляж и крыло в авиастроении [13–15], определении состояния двигателей [16], контроле работы поршневых и центробежных машин [17]. Решение подобной задачи предполагает разработку основ и принципов дистанционной диагностики, основанных на современных методах обработки сигналов и решения обратных задач. Создание, теоретическое и экспериментальное обоснование данных методов и принципов, обладающих высокой степенью универсальности, является сферой изучения радиофизики и акустики.

Локализация виброисточников производится на основе измерений вибрационного или акустического полей в наборе контрольных точек конструкции (местоположение которых, как правило, не совпадает с местоположением виброисточников). Определение характеристик источников или среды по измеренным в разных точках значениям поля предполагает использование пространственной обработки сигналов [18]. Она находит широкое применение во множестве областей, в том числе виброакустике [19, 20]. Многие методы пространственной обработки, являющиеся инструментом и предметом разработки радиофизики, первоначально предложенные в одной области, могут успешно применяться и стать стандартными для другой. При этом может потребоваться адаптация методов для данной конкретной задачи (с учетом модели сигнала, типа волн, среды и т.д.), подразумевающая, как правило,

создание новых способов анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех (что соответствует области изучения статистической радиофизики). Модификация существующих алгоритмов и разработка новых на основе известных принципов, с последующей апробацией в решении обратных задач (в том числе, локализации источников), могут существенно улучшить качество определения неизвестных параметров.

В данной работе рассматриваются методы локализации виброисточников, основанные на измерениях вибрационного поля. Общим для подобных методов решения задачи локализации является сопоставление экспериментально измеренных характеристик (ускорение, перемещение) с характеристиками, полученными с помощью численного расчета или предварительной экспериментальной калибровки. Положение источника, для которого модельное вибрационное поле максимально похоже на экспериментальное, считается наиболее вероятным. Локализация путем подобного сопоставления может производиться как во временной области, так и в частотной. Таким образом, решение задачи локализации виброисточников основано на применении методов пространственной обработки сигналов. Отметим, что задача оценки временной реализации виброисточника тесно связана с задачей локализации: во многих работах задачи локализации и реконструкции воздействия решаются совместно.

Методы локализации виброисточника можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, не связанные с использованием численной модели конструкции. Они предполагают использование определенной экспериментальной информации о характеристиках конструкции. Это могут быть, например, функции коэффициентов передачи (frequency response function, FRF) для данной задачи, полученные путем предварительной калибровки [15,16], характеристики дискретных составляющих спектров механизмов, расположенных на данной конструкции, собственные частоты и формы колебаний [12,13,20]. Главным недостатком данных методов является необходимость предварительной калибровки (зачастую невозможной), а также необходимость наличия баз данных

спектров и возможные проблемы селекции отдельных источников при работе нескольких механизмов.

Ко второй группе относятся методы, использующие численную модель конструкции. Их можно сравнить с аналогичными методами пространственной обработки MFP (Matched – Field Processing), часто применяемыми в гидроакустике [6]. Например, в работе [21] авторы рассматривают ситуацию, когда на закрепленном с двух концов стержне в контрольных точках установлены датчики ускорения; в неизвестной точке расположен источник, воздействие которого задается ориентированной определенным образом гармонической силой. Далее, различными методами пространственной обработки, широко применяемыми в MFP-техниках (например, с помощью оценивателя Бартлетта), производилось сравнение экспериментальных данных акселерометров с модельными данными вибрации, создаваемой установленным в определенной точке источником. Точка установки виброисточника определяется по максимуму функции неопределенности, рассчитанной соответствующим оценивателем. В рассматриваемой работе [21] модельные данные получены аналитически. Однако, для более сложной конструкции это сделать проблематично. Для получения модели в этом случае может быть использовано конечно-элементного моделирования (КЭМ) [22]. В работе [23] для сопоставления модельных (полученных с помощью конечно-элементного моделирования) и экспериментальных данных во временной области с целью локализации и реконструкции вибрационного воздействия используется метод наименьших квадратов (МНК). При этом для минимизации влияния возможного рассогласования (которое неизбежно присутствует в той или иной мере) модели и реальной функции Грина используется регуляризация Тихонова. Вопросам регуляризации в задаче локализации виброисточника посвящены, например, работы [24,25]). В данных работах локализация в основном проводилась путем обработки во временной области. Также обработка может производиться в частотной области (например, в работе [26]).

Стоит отметить и другие разнообразные техники локализации виброисточника ([14, 27–35]). Для поиска виброисточника активно применяется машинное обучение [27,28]. Обучающими данными для нейронной сети с учителем являются результаты численных [28] (при использовании КЭМ) или реальных [27] экспериментов с заранее известным положением источника. Обученная нейронная сеть в дальнейшем используется для локализации источника с неизвестным положением.

Отдельно стоит упомянуть работы, посвященные локализации виброисточника с использованием определения времен прихода упругих волн в среде. В работах [29,30] локализация источника производится за счет триангуляции при помощи асимметричной волны Лэмба (A0) нулевого порядка, в работе [14] использовался МНК для минимизации расстояния между экспериментальными временами прихода упругих волн и временами, полученными конечно-элементным моделированием. В статье [13] модифицирована классическая триангуляция – создана сложная техника с использованием низкочастотного диапазона (10–50 Гц) и данных модового анализа. В работе [31] для определения времен прихода упругих волн, которые используются в дальнейшем для локализации источника, применяется вейвлет-преобразование сигналов с пьезоэлектрических датчиков. В [32] при поиске неизвестных параметров случайных сигналов воздействий совместно использовались тензометрические и вибрационные датчики. Среди техник локализации виброисточника также можно отметить использование модификаций методов релевантных векторов [33], фильтра Калмана [34], генетического алгоритма и алгоритма «water cycle» [35].

Таким образом, тематика определения положения источника виброактивности является весьма актуальной. Существует ряд проблем, связанных с локализацией виброисточников. В имеющихся публикациях редко рассматривается постановка задачи локализации, когда в конструкции или исследуемом объекте находится одновременно несколько виброисточников. В работе [36] изучается вопрос о локализации двух источников, однако исследуемая

конструкция предельно проста, а функции ее коэффициентов передачи описываются аналитически. В основном в работе внимание уделено реконструкции вибрационного воздействия. Принципиальным ограничением большинства используемых в работах алгоритмов является требование единственности источника. При отсутствии ограничений на конфигурацию источников задача локализации является, как правило, некорректной.

Даже при наличии единственного виброисточника существенной проблемой является возможная некорректная локализация. В случае, когда ошибка локализации слишком велика, целесообразно говорить об аномальной [37] ошибке. В случае некорректной локализации основными причинами являются, как правило, низкое отношение сигнал/шум (ОСШ) и рассогласование экспериментальной (реальной) и модельной функций коэффициентов передачи (функций Грина). Проблема низкого ОСШ в вибраакустике имеет особое значение в задачах, связанных с мониторингом состояния конструкций (в зарубежной литературе – Structural Health Monitoring (SHM)) [38]: именно в условиях данных задач слабый источник вибрации может маскироваться множеством существенно более сильных посторонних воздействий. В большинстве работ, посвященных поиску виброисточника с использованием численной/аналитической модели конструкции, задача локализации не рассматривается в свете максимизации выходного ОСШ (за счет в первую очередь временного накопления сигнала). Например, в работе [39] рассматривается задача локализации широкополосного источника вибрации в механоакустической конструкции, но при этом не уделяется внимания методам временного накопления и оптимальной обработке вибрационного сигнала в присутствии шума.

Отметим, что в вибраакустике могут рассматриваться как детерминированные, так и случайные воздействия [40]. В большинстве реальных сигналов в той или иной степени присутствует случайная компонента. Недостаточно исследованным остается вопрос об оптимальной обработке случайных сигналов в вибраакустических приложениях. При этом, известно, что

оптимальная обработка полностью случайного сигнала также является оптимальной в условиях априорного незнания формы сигнала [41], и методы, разработанные для случайных сигналов, оказываются универсальными и применимыми для множества других случаев.

При высоком ОСШ главной причиной ошибок локализации становится рассогласование реальной конструкции и ее модели, подобное рассогласование в той или иной степени присутствует всегда. Отметим, что даже после доводки и (или) верификации КЭМ [42] оставшееся различие может приводить к существенным ошибкам локализации. При этом проблема рассогласования в задачах локализации виброисточников тесно связана с пространственной конфигурацией и состоянием вибродатчиков. Остановимся на этом замечании подробнее.

Известно, что для одной конкретной КЭМ, с конкретным рассогласованием, при удачном расположении датчиков, их количество, необходимое для решения виброакустической задачи, может быть сравнительно небольшим (например, 10–15). При этом неудачное расположение такого же количества датчиков, когда ряд датчиков установлен в узлах нескольких мод или в точках существенного несоответствия реальной конструкции и КЭМ, может привести к неверным выводам при диагностике. Таким образом, подбор подходящей геометрии расположения датчиков весьма важен. Существует большое число работ, посвященных оценке качества пространственных конфигураций датчиков при решении различных задач виброакустики. Успешно используется оптимизация расположения вибродатчиков с помощью критериев MAC (Modal Assurance Criterion)[43], EI (Effective Independence)[44], MKE (Modal Kinetic Energy) [45]. Критерий MAC основан на расчете матрицы корреляции мод в интересующих частотных диапазонах для заданной пространственной конфигурации набора датчиков (при ограничении на общее число датчиков). Информация о значениях внеdiagональных элементов матрицы корреляции может быть использована для оптимизации расположения вибродатчиков. А именно, при вибродиагностике наилучшим можно считать набор датчиков с минимальными значениями

коэффициента корреляции мод на датчиках. Критерий EI использует информационную матрицу Фишера [46] для решения той же задачи, для которой используется MAC, – оптимизация линейной независимости собственных пространственных форм в точках установки вибродатчиков. В критерии MKE используется информации о кинетической энергии колебаний в этих точках. Данные критерии и их модификации позволяют существенно улучшить устойчивость задачи. При оптимизации расположения могут использоваться как модельные представления (полученные, например, с помощью КЭМ), так и предварительные экспериментальные данные (полученные калибровкой конструкции).

Часто конфигурация расположения датчиков фиксирована, а их пространственное расположение ограничено техническими возможностями. В этом случае актуальной становится задача отделения «хороших» датчиков от «плохих», которые могут ухудшить результат решаемой задачи локализации. Появление «плохих» датчиков может быть связано с выходом из строя самих преобразователей, их неудачным расположением (например, в узлах мод, либо в точках большого рассогласования с моделью) или изменением характеристик конструкции и механизма со временем, уже после создания численной модели. Самое важное, что определение таких «плохих» датчиков может существенно нивелировать влияние упомянутого ранее рассогласования между реальной конструкцией и КЭМ на ошибки локализации.

Показания таких «плохих» вибродатчиков будем называть выбросами или аномалиями. Наличие аномалий говорит о непригодности датчика для дальнейшей работы. Под аномалией датчика в данном случае мы имеем в виду не только его аппаратную неисправность, но и то, что в точке установки датчика велика разница между модельными и экспериментальными данными. Отметим, что при решении задачи обнаружения и классификации аномалий данных с вибродатчиков могут использоваться методы обработки показаний датчиков, широко применяемые и в отличных от виброакустики областях (геофизика, метеорология, беспроводная связь и т.д.). Детальный обзор таких методов

представлен в [47]. Приведем здесь некоторые работы, посвященные задачам борьбы с выбросами в показаниях датчиков.

Для решения задачи обнаружения и классификации выбросов часто используются алгоритмы, основанные на методе главных компонент (PCA) [48]. Данный метод заключается в уменьшении размерности задачи путем нахождения компонент, создающих ортогональный базис для данной задачи. Метод главных компонент в приложении к рассматриваемой проблеме нашел применение во множестве разных областей. В виброакустике данный метод может быть использован для обнаружения и локализации дефекта в конструкции. В работе [49] авторы предполагают, что дефект в определенной области конструкции можно ассоциировать с появлением аномалии в показаниях соответствующего вибродатчика. Подобный «плохой» вибродатчик и предполагаемую область дефекта можно обнаружить путем сравнения углов между подпространствами [50], образованными главными компонентами (при определенных условиях главные компоненты совпадают с модами конструкции) принятого сигнала в обычном и дефектном состояниях конструкции. Устранение «плохого» вибродатчика ведет к существенному уменьшению угла (т.е. «разницы») между подпространствами. Несколько отличная методика, связанная с PCA, используется в работе [51] для обнаружения дефектного подшипника. В этих работах «плохим» является датчик, ассоциированный с определенным дефектом самой конструкции. В ряде работ [52,53] «плохим» также считается датчик, вышедший из строя. В отсутствие априорной информации о причине выбросов может стать актуальной задача классификации. Решению задачи обнаружения выбросов показаний и их классификации посвящена, к примеру, статья [54].

Другим распространенным подходом является использование алгоритмов, основанных на нейронных сетях (ANN – Artificial Neural Network) различных типов. В виброакустике машинное обучение часто используется в разных приложениях, например, для диагностики механизмов [55], обнаружения дефектов в строительных конструкциях [56]. ANN используются и для обнаружения «плохих» датчиков, и для их классификации как во временной, так и

в частотной областях. Помимо ANN и РСА, для обработки выбросов используются, к примеру, вейвлет – преобразования [57], кластерный анализ [58], выделение «эмпирических мод» (EMD) [59]. Суть методов в общем можно описать как использование классификации и машинного обучения для разделения условно «нормального» и дефектного состояний системы. К примеру, существенное снижение сходства между эмпирическими модами сигнала с вибродатчиков в момент запуска механизма и в ходе дальнейшей эксплуатации может свидетельствовать о наличии неисправностей.

Применение обработки «плохих» показаний датчиков при решении задачи локализации виброисточников требует дополнительного исследования. Распространенные методы обнаружения аномалий датчиков основываются, прежде всего, на экспериментальных данных. При этом для успешного решения обратной виброакустической задачи и минимизации эффектов рассогласования характеристик конструкции и КЭМ необходимо совмещение и экспериментальной и модельной (априорной) информации.

Можно заключить, что, хотя тема локализации виброисточников получила освещение во множестве работ в теоретическом и прикладном аспектах, ряд ключевых для успешного решения обратной задачи вопросов остаются малоисследованными. Решению вышеуказанных проблем обработки сигналов при наличии нескольких одновременно работающих виброисточников, в присутствии шумов, некорректных измерений на датчиках и рассогласования модели и конструкции посвящена настоящая работа.

Цель диссертационной работы

В соответствии с изложенным выше кругом проблем основной целью диссертационной работы является разработка устойчивых к рассогласованию методов локализации одного и нескольких виброисточников с применением пространственной обработки сигналов и алгоритма определения «плохих»/аномальных вибродатчиков.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка методов локализации единственного виброподатчика на основе принципа максимума правдоподобия. Апробация данных методов. Анализ влияния ОСШ на качество локализации.
2. Разработка алгоритма локализации нескольких одновременно работающих виброподатчиков. Численное моделирование и экспериментальная апробация данного алгоритма. Анализ результатов локализации, оценка влияния параметров алгоритма и исследуемых конструкций на качество локализации.
3. Разработка алгоритма определения аномалий данных на виброподатчиках, предполагающего совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Апробация данного алгоритма в задаче локализации источников с оценкой эффективности алгоритма для поиска ошибок показаний датчиков разного типа.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, векторного анализа и теории матриц, а также методы математического и компьютерного моделирования. Особое внимание в диссертации уделено экспериментальной апробации предложенных методов и алгоритмов, которая подтвердила их эффективность, а также исследованию и анализу ошибок локализации.

Научная новизна диссертационной работы

1. На основе принципа максимума правдоподобия разработан ранее не применяющийся метод локализации единственного виброподатчика. Для сложных механоакустических конструкций (для воспроизведения вибрационных характеристик требуется не менее $10^4 \div 10^5$ узлов) в исследуемом частотном диапазоне экспериментально подтверждена его эффективность. Показано, что разработанный метод обладает меньшими погрешностями оценок параметров

виброисточника (местоположение и ориентация), в сравнении с известными методами.

2. Предложена модификация метода MUSIC (MUltiple SIgnal Classification), позволяющая решить задачу локализации нескольких работающих виброисточников. Показано, что данная модификация обладает большей эффективностью при решении задачи локализации с двумя источниками по сравнению с методами наименьших квадратов и максимума правдоподобия, рассчитанными на единственный источник, притом что данные методы для модели двух источников неприменимы ввиду высокой вычислительной сложности. Показано, что суммирование целевых функций модифицированного метода MUSIC, рассчитанных для разных частотных полос, улучшает результат локализации. Модифицированный метод апробирован в экспериментах с несколькими конструкциями.

3. Для решения задачи определения различного рода аномалий данных на вибродатчиках и минимизации их влияния на результат решения обратной задачи предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным. Главной особенностью метода является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Эффективность алгоритма продемонстрирована в задаче локализации виброисточников в разных конфигурациях. Разработанный алгоритм может быть использован и в других приложениях, где решение обратной задачи происходит с использованием численной или аналитической модели.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

На основе известных принципов пространственной обработки сигналов проведены разработка, исследование и экспериментальная апробация методов локализации виброисточников. Разработанные методы локализации могут быть использованы при проектировании, обслуживании, акустической диагностике конструкций и механизмов. Разработан и экспериментально апробирован новый проекционный алгоритм определения аномальных измерений на датчиках.

Алгоритм экспериментально апробирован в различных задачах и может быть использован во множестве приложений радиофизики и акустики. Результаты работы использовались при разработке программного обеспечения высокопроизводительного численного моделирования виброакустических характеристик и акустической диагностики «САТЕС» в рамках соответствующего гранта-субсидии Минпромторга.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждаются их сравнением с результатами, полученными с помощью математического моделирования, экспериментальной апробации, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям радиофизики и акустики.

Апробация результатов

Результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

XXIII-я научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2019.

24-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). 2019

XXII-я сессия Российского акустического общества. Москва, 2019.

XXII-ой конкурс молодых ученых ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2020

V Международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин DVM-2020»

XXVIII-я научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2024.

XXVI-я сессия Российского акустического общества. Москва, 2024.

Основные материалы диссертации опубликованы в 9 работах. Среди них 2 статьи в журналах, включенных в библиографические базы данных Web of

Science, Scopus («Acoustical Physics» [60], «Physics of wave phenomena» [61]), 1 статья опубликована в журнале, включенном в перечень ВАК (специальность 1.3.4 – Радиофизика, физико-математические науки) и базу данных RSCI, («Журнал радиоэлектроники» [62]) и 6 работ, представляющие собой опубликованные материалы докладов [63–68] на научных конференциях. Также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ[69].

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в получении всех результатов, представленных в данной диссертационной работе. Он участвовал в постановке задач, непосредственной разработке методов, проведении аналитических расчетов, компьютерного моделирования, экспериментальной апробации, а также в обсуждении полученных результатов и подготовке их к печати.

Структура и объем диссертации

Настоящая диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 104 страницы, включая 44 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 82 наименований.

Во введении освещается современное состояние проблемы локализации, оценки числа виброисточников, значение решения данной проблемы для вибродиагностики. Представлены обзор литературы по теме исследований, цели и задачи работы, научная новизна диссертации, научная и практическая значимость работы, методы исследования, основные результаты диссертационной работы, структура и объем работы, а также достоверность представленных в работе результатов, их апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

В первой главе рассмотрена задача локализации единственного виброисточника. Сформулированы метод максимума правдоподобия для задачи локализации единственного виброисточника, а также упрощенный подход (в сравнении с методом максимума правдоподобия) – метод наименьших квадратов

для локализации виброисточника. Проведено исследование эффективности вышеуказанных методов в зависимости от ОСШ. Приведены результаты численного моделирования и апробации методов на экспериментальных конструкциях (для верифицированных и неверифицированных КЭМ). Приведены оценки необходимого числа полос и вибродатчиков для успешной локализации. Представлена информация о применении предложенных методов в разработанном программном обеспечении.

Во второй главе рассмотрена задача локализации нескольких виброисточников. Показана невозможность практического применения методов локализации единственного виброисточника к данной задаче. Для решения задачи локализации нескольких виброисточников предложен метод, основанный на модификации метода MUSIC. Модифицированный метод MUSIC экспериментально апробирован, а также исследован с помощью численного моделирования. Показана возможность определения числа одновременно работающих виброисточников по спектру собственных чисел корреляционной матрицы сигнала.

В третьей главе рассмотрена задача определения ошибок (аномалий) измерений на вибродатчиках, вызванных аппаратными неисправностями или рассогласованием между КЭМ и экспериментом. Для её решения предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным. Показано, что предложенный подход позволяет обнаруживать аномальные приёмники различного типа. Особенностью метода является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Эффективность предложенного метода продемонстрирована в задаче локализации одного и двух виброисточников, при разных типах ошибок. Дополнительно применимость разработанного алгоритма показана в задаче диагностики приемной систем (решетка микрофонов) для локализации источников плоских волн.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, подведены итоги, сделаны теоретические и практические выводы.

Положения, выносимые на защиту

1. Полученный метод пространственной локализации единственного виброисточника на основе принципа максимального правдоподобия, с использованием конечно-элементного моделирования, обладает меньшими погрешностями оценок параметров виброисточника, в сравнении с известными методами.

2. Предложенная модификация метода пространственной обработки MUSIC позволяет разрешить источники вибрации в существенно большем числе частотных полос, по сравнению с ранее применявшимися методами, при решении задачи локализации с использованием конечно-элементного моделирования.

3. Предложенный проекционный алгоритм пространственной обработки сигналов, основанный на совмещении конечно-элементной модели и экспериментальных данных, позволяет существенно улучшить результат локализации виброисточников за счет удаления аномальных измерений.

ГЛАВА 1. Локализация единственного виброисточника

Задача локализации вибрационного источника – распространенный тип обратной задачи, имеющий множество приложений при диагностике, обслуживании, проектировании и испытании конструкций и механизмов. Существует множество техник решения данной задачи [11–16, 21, 23–36,39], общим для методов решения задачи локализации является сопоставление экспериментально измеренных в наборе точек характеристик вибрационного поля конструкции с модельными характеристиками (полученными с помощью численного расчета или предварительной экспериментальной калибровки). Точка конструкции, для которой модельное вибрационное поле максимально похоже на экспериментальное, считается наиболее вероятной точкой расположения виброисточника.

Основными причинами ошибок при локализации источников являются рассогласование характеристик модели и реальной конструкции (в той или иной степени присутствующее всегда), плохая обусловленность задачи в ряде случаев, а также низкое ОСШ. В ряде задач, имеющих отношение к мониторингу состояния конструкций (SHM) проблема низкого ОСШ может иметь особое значение. В большинстве работ, посвященных поиску виброисточника с использованием численной и (или) аналитической модели конструкции, задача локализации не рассматривается в свете максимизации выходного ОСШ (за счет в первую очередь временного накопления сигнала). В рамках настоящей работы на основе принципа максимума правдоподобия разработан метод локализации единственного виброисточника (а также его упрощенная модификация). В настоящей главе приведены результаты численного моделирования и экспериментальной апробации данных методов.

Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [60,61,65,69].

1.1 Постановка задачи локализации виброисточника

Будем считать, что имеется некоторая сложная механоакустическая система (конструкция), для которой построена конечно-элементная модель, состоящая из определенного числа узлов. Будем считать, что в некотором узле расположен виброисточник. Этот виброисточник ориентирован определенным образом в пространстве, а сигнал, возбуждающий виброисточник, является широкополосным белым гауссовским шумом. В данном исследовании в качестве виброисточника использовался пьезоэлектрический возбудитель. Будем также считать, что в каждой узкой частотной полосе амплитудно-частотная характеристика виброисточника близка к константе, а сигнал, соответственно, является белым шумом. В K точках конструкции находятся вибродатчики (акселерометры), а принимаемый сигнал подвергается узкополосной фильтрации на частоте f_0 (см. рисунок 1.1).

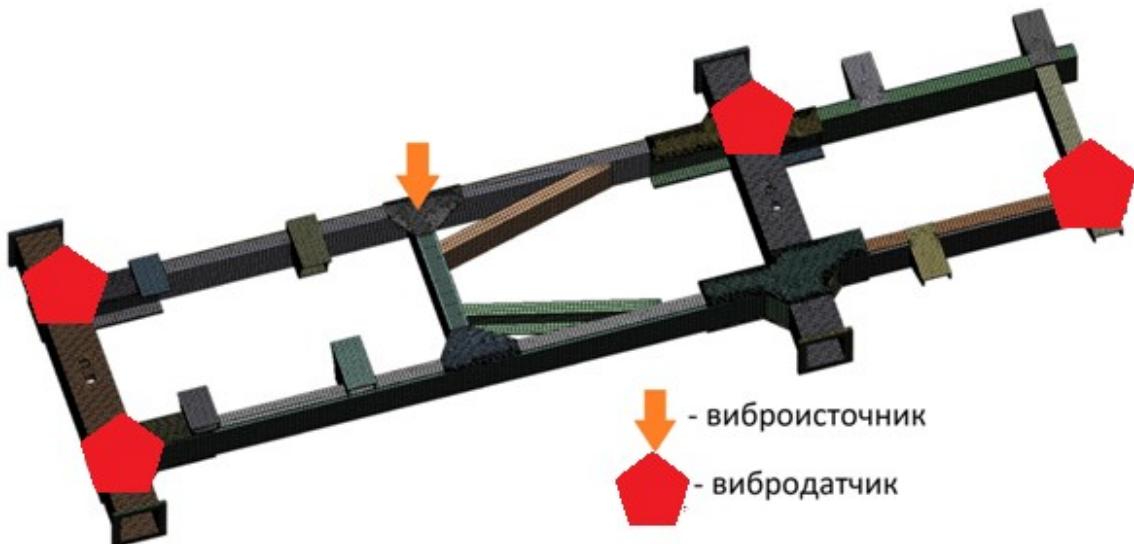


Рис. 1.1. Механоакустическая конструкция, иллюстрация задачи локализации виброисточника. Метками разных цветов показаны вибродатчики и виброисточник

Модель принимаемого сигнала на частоте f_0 в момент времени с номером j можно записать как следующий $K \times 1$ вектор:

$$\mathbf{v}_j = p_j \mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F} + \boldsymbol{\xi}_j, \quad j = 1, \dots, K, \quad (1.1)$$

где p_j – временная форма узкополосного сигнала, представляющая комплексный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ_s^2 , (определенной интенсивностью вибрационного источника), \mathbf{F} – вектор 3×1 нормированных комплексных составляющих силы ($\mathbf{F}^H \mathbf{F} = 1$), $\boldsymbol{\xi}_j$ – временные отсчеты аддитивного белого гауссова шума с нулевым средним и дисперсией σ_0^2 , $\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i)$ – $K \times 3$ матрица комплексных коэффициентов передачи из узла с координатами x_i, y_i, z_i (координаты виброисточника) в узлы, соответствующие контрольным точкам (в которых находятся вибродатчики). Относительно размерности \mathbf{A} следует сделать небольшое пояснение: каждая из K строчек матрицы \mathbf{A} содержит три комплексных коэффициента передачи (например, (a_{1x}, a_{1y}, a_{1z})) от каждой из составляющих силы, приложенной в данном узле, в соответствующую контрольную точку.

Матрица \mathbf{A} получается путем численного моделирования с использованием конечно-элементной модели конструкции по принципу взаимности. Для уменьшения разницы между модельной и реальной матрицами \mathbf{A} предварительно может проводиться процедура доводки ряда характеристик модели (см., например, [42]). Доводка производится в три этапа и в определенном частотном диапазоне. На первом этапе производится расчет собственных частот и собственных форм колебаний модели. На втором этапе проводится эксперимент с реальной конструкцией с целью определить собственные частоты и формы колебаний конструкции. На последнем этапе производится корректировка КЭМ (изменение модулей Юнга элементов), корректировка проводится до тех пор, пока собственные частоты и формы колебаний КЭМ и конструкции не совпадут. При высоком ОСШ именно от качества доводки зависит качество результата локализации. Понятно, что большое рассогласование (разница между модельной и

реальной матрицами \mathbf{A}) может привести к большой ошибке при поиске источника. В качестве примера на рисунке 1.2 приведен результат доводки для одной из используемых конструкций.

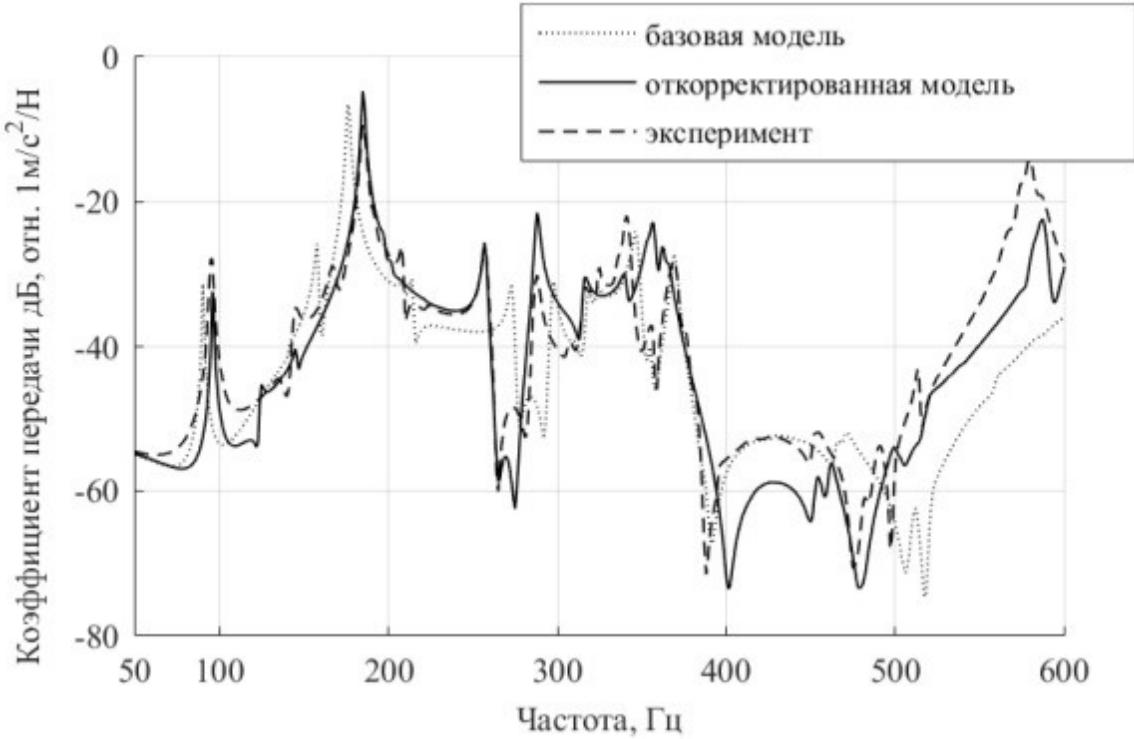


Рис. 1.2. Экспериментальные и расчетные коэффициенты передачи из точки установки вибронизлучателя в одну из контрольных точек. Расчетные коэффициенты приведены для модели до и после доводки

Здесь показаны экспериментальные и расчетные (до доводки и после) коэффициенты передачи из точки возбуждения конструкции в одну из контрольных точек в зависимости от частоты. Видно, что после доводки расчетная зависимость заметно приблизилась к экспериментальной. Стоит отметить, что при этом сохраняется некоторое рассогласование между модельными и реальными данными.

1.2 Метод максимума правдоподобия в задаче локализации единственного источника

Для модели (1.1) в случае отсутствия рассогласования оптимальным является метод максимума правдоподобия (МП). Метод максимума правдоподобия [70] заключается в максимизации функции правдоподобия (ФП) w , логарифм которой для модели (1.1) записывается следующим образом:

$$\ln w = -J \left[\ln \det(\sigma_s^2 \mathbf{A} \mathbf{F} \mathbf{F}^H \mathbf{A}^H + \sigma_0^2 \mathbf{I}) + \text{tr}((\sigma_s^2 \mathbf{A} \mathbf{F} \mathbf{F}^H \mathbf{A}^H + \sigma_0^2 \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{K}}) \right], \quad (1.2)$$

где $\hat{\mathbf{K}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^H$ – выборочная корреляционная матрица принятого сигнала.

Неизвестными параметрами здесь являются (x, y, z) , σ_0^2 , σ_s^2 , \mathbf{F} . Для дальнейших преобразований удобно сделать замену переменных $\mathbf{F} \rightarrow \mathbf{g} = \sigma_s \mathbf{F} / \sigma_0$. После этого логарифм ФП можно записать как

$$\ln w = -J \left[K \ln \sigma_0^2 + \ln(1 + \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{g}) + \sigma_0^{-2} \text{tr}((\mathbf{A} \mathbf{g} \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H + \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{K}}) \right]. \quad (1.3)$$

Далее легко найти частный максимум (1.3) по параметру σ_0^2 путем решения

уравнения $\frac{\partial \ln w}{\partial \sigma_0^2} = 0$. Решение этого уравнения записывается следующим образом

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{1}{K} \left(\text{tr} \hat{\mathbf{K}} - \frac{\mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A} \mathbf{g}}{1 + \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{g}} \right). \quad (1.4)$$

Подставим (1.4) в ФП (1.3) и получим новую ФП $w_1 = w(\hat{\sigma}_0^2)$, не зависящую от σ_0^2 :

$$\ln w_1 = -J \left[K \ln \left(\text{tr} \hat{\mathbf{K}} - \frac{\mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A} \mathbf{g}}{1 + \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{g}} \right) + \ln(1 + \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{g}) + K - K \ln K \right]. \quad (1.5)$$

Далее будем искать экстремум (1.5) по \mathbf{g} путем решения уравнения $\frac{\partial \ln w_1}{\partial \mathbf{g}^H} = 0$.

После некоторых преобразований это уравнение можно записать следующим образом:

$$(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A} \mathbf{g} = \frac{\alpha}{\beta} \mathbf{g}, \quad (1.6)$$

где $\alpha = K\mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A} \mathbf{g} + (1 + \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{g}) \text{tr}((\mathbf{A} \mathbf{g} \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H + \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{K}})$, $\beta = K(1 + \mathbf{g}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{g})$.

Уравнение (1.6) представляет собой уравнение на собственный вектор матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A}$. Решение уравнения (1.6) определено с точностью до произвольного множителя. Поэтому будем искать его в виде $\hat{\mathbf{g}} = \gamma \mathbf{\omega}$, где $\mathbf{\omega}$ – нормированный собственный вектор матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A}$, γ – неопределенный множитель. После подстановки этого решения в (1.6) получится выражение для γ :

$$\hat{\gamma} = \left(\frac{1}{\mathbf{\omega}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{\omega}} \frac{K\lambda - \text{tr} \hat{\mathbf{K}}}{\text{tr} \hat{\mathbf{K}} - \lambda} \right)^{1/2}, \quad (1.7)$$

где λ – максимальное собственное число матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A}$. В результате получится полное решение $\hat{\mathbf{g}} = \hat{\gamma} \mathbf{\omega}$. Подстановка этого решения в (1.5) приведет к ФП, зависящей только от координат вибрационного источника (x, y, z) . В результате процедура поиска координат источника приобретает следующий вид:

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \arg \max_{x, y, z} S_{ML}(x, y, z); \quad S_{ML}(x, y, z) = -(K - 1) \ln(\text{tr} \hat{\mathbf{K}} - \lambda) - \ln \lambda. \quad (1.8)$$

Оценка положения источника производится в данном случае в одной частотной полосе. В случае широкополосного сигнала целесообразно и оптимально суммировать значения целевой функции (1.8), полученные для разных частот.

1.3 Метод наименьших квадратов в задаче локализации

Альтернативой методу максимума правдоподобия, описанному выше, является другой, упрощенный метод. Он заключается в следующем. Вначале находится собственный вектор \mathbf{V} выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала, соответствующий максимальному собственному числу. Этот вектор является максимально правдоподобной оценкой сигнального вектора (первого слагаемого в (1.1)) в предположении его полной неизвестности [70].

Далее для определения неизвестных параметров источника используется метод наименьших квадратов (МНК)¹. В нем в качестве модели используется вектор $\bar{\mathbf{F}} = \alpha \mathbf{F}$, где α – масштабный коэффициент. Этот коэффициент вводится из-за того, что в обработке используется нормированный собственный вектор, то есть $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = 1$. Такой подход обладает чуть меньшей эффективностью по сравнению со строгой МП-оценкой. Отметим, что при высоком ОСШ разница практически нивелируется, так как в таком случае точность локализации определяется в первую очередь рассогласованием реальной и модельной матрицами \mathbf{A} . При этом упрощенный метод обладает значительной меньшей вычислительной сложностью: в 2-3 раза для экспериментальных конфигураций используемых в настоящей работе. Целевая функция метода наименьших квадратов в рассматриваемой ситуации записывается следующим образом:

$$S(x, y, z, \bar{\mathbf{F}}) = (\mathbf{A} \bar{\mathbf{F}} - \mathbf{V})^H (\mathbf{A} \bar{\mathbf{F}} - \mathbf{V}), \quad (1.9)$$

а решение сводится к её минимизации: $S(x, y, z, \bar{\mathbf{F}}) \rightarrow \min_{x, y, z, \bar{\mathbf{F}}}$.

Для нахождения минимума (1.9) приравниваем к нулю ее частные производные по $\bar{\mathbf{F}}$. В результате решения уравнения $\frac{\partial S}{\partial \bar{\mathbf{F}}} = 0$ находим оценку неизвестных компонент действующей силы: $\hat{\bar{\mathbf{F}}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{V}$. Далее это выражение подставляется в (1.9), в результате чего получается целевая функция, не зависящая от $\bar{\mathbf{F}}$:

$$S_1(x, y, z) = \mathbf{V}^H \mathbf{V} - \mathbf{V}^H \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{V} \rightarrow \min_{x, y, z}. \quad (1.10)$$

Учитывая, что $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = 1$, перейдем к следующему выражению целевой функции, которая, по сути, является коэффициентом корреляции между модельными данными и экспериментом:

$$S_2(x, y, z) = \mathbf{V}^H \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{V} \rightarrow \max_{x, y, z}. \quad (1.11)$$

¹ В дальнейшем, под МНК будет подразумеваться именно метод наименьших квадратов в применении к первому собственному вектору, если не указано иное

Таким образом, в соответствии с (1.11) узел с наибольшим коэффициентом корреляции является местом наиболее вероятного расположения источника. Как и в случае с функцией (1.8), целесообразно суммировать значения функции (1.11), полученные для разных частотных полос.

Характерным свойством функции (1.11) является то, что ее значения лежат в диапазоне от 0 до 1 (поскольку $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = 1$). Вообще говоря, можно и не применять данную нормировку. Однако, наибольшее рассогласование конечно-элементной модели и реальной конструкции наиболее велико в частотных полосах, близких к собственным частотам (модам) конструкции. Нормировка позволяет избежать при суммировании по частотам сильного негативного влияния «плохих» (со значительным рассогласованием) частотных полос. В сущности, такая нормировка позволяет совершать выбор частот, не заботясь о возможной близости некоторых выбранных частот к модам конструкции.

1.4 Экспериментальная апробация и численное моделирование методов локализации единственного виброисточника

Для исследования эффективности методов (1.8) и (1.11) было вначале проведено имитационное моделирование с простой модельной пластиной, а после – имитационное моделирование и экспериментальная апробация с двумя механоакустическими конструкциями.

Для предварительного имитационного моделирования использовалась пластина размером 45x17 см, в 10 точках были установлены датчики виброускорения. Поиск широкополосного источника с помощью методов (1.8) и (1.11) производился при отсутствии шума и рассогласования между модельной и реальной матрицами коэффициентов передачи. Результат предварительного имитационного моделирования для МНК (1.11) и МП (1.8) приведен на рисунке 1.3. Цветом показано распределение целевых функций различных методов на

пластине, маркером отмечено положение вибрострочника (в данном случае ошибка локализации отсутствует).

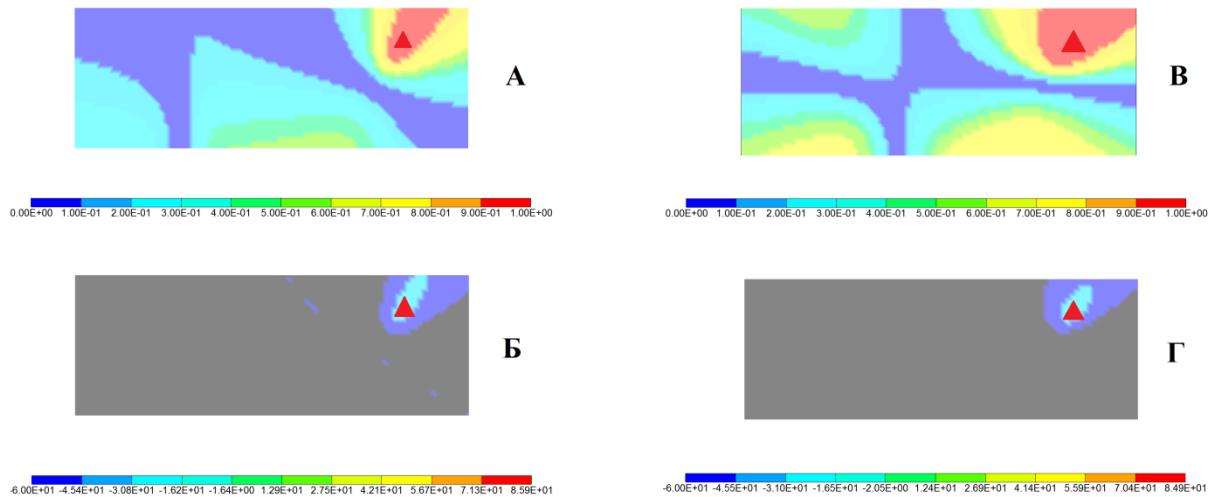


Рис. 1.3. Яркостные распределения целевых функций МНК (1.11) и МП (1.8). Имитационное моделирование с пластиной. Локализация широкополосного источника с помощью МНК и МП в двух частотных полосах частотных полосах, 10 установленных вибродатчиков. Треугольным маркером показана оценка положения вибрострочника (максимумы целевых функций). А-МНК (130 Гц) Б-МП (130 Гц), В-МНК(150 Гц), Г - МП(150 Гц)

Приведем результаты моделирования и экспериментальной апробации для первой механической конструкции. Данная конструкция с отмеченными акселерометрами и вибрострочниками представлена на рисунке 1.4. На рисунке 1.4 представлены: одна из экспериментальных конфигураций с одним вибрострочником (А) и двумя вибрострочниками (Б) (задача локализации нескольких источников рассмотрена в главе 2 настоящей работы), КЭМ конструкции (В).

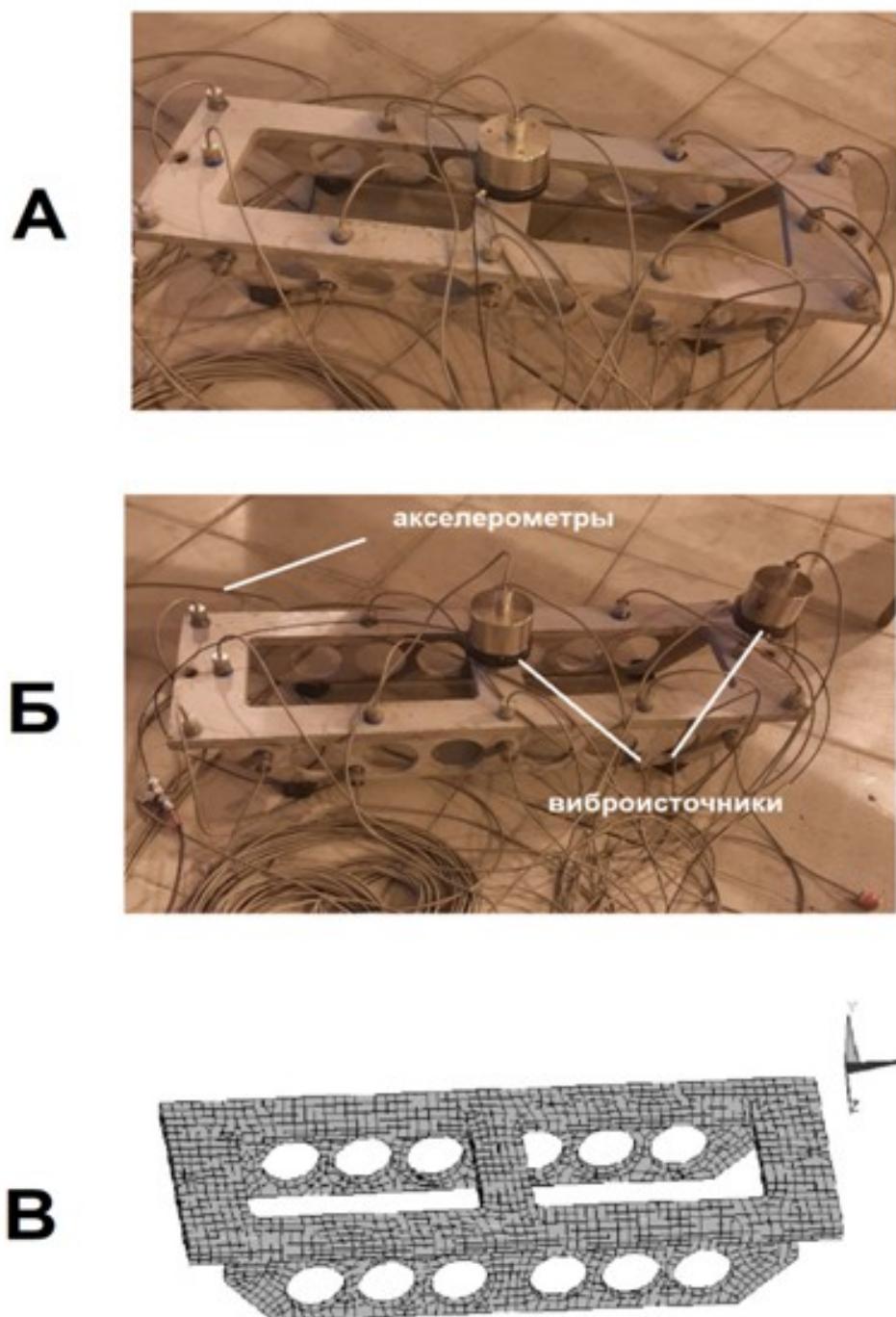


Рис. 1.4. А – эксперимент с одним виброисточником, Б – эксперимент с двумя виброисточниками, В – КЭМ конструкции. Первая конструкция

Длина конструкции составляет около 0,8 м, ширина – 0,23 м, высота – 0,14 м, число узлов около 25000, число элементов – около 6000. В экспериментах в

качестве вибродатчиков использовались пьезоэлектрические акселерометры, установленные в контрольных точках модели и подключенные к системе сбора данных. При этом каждый из акселерометров был ориентирован по одной из осей (x , y или z) по нормали к поверхности модели. В качестве виброисточника использовался вибровозбудитель, излучавший широкополосный белый гауссовский шум в диапазоне 100–800 Гц. В реальном и численном экспериментах были рассмотрены различные положения виброисточника. В эксперименте с первой конструкцией на ней было установлено 22 акселерометра, а на виброисточнике размещался еще один акселерометр для контроля мощности. Сигнал на виброисточник подавался в течение около 2 минут. Численный расчет модельной матрицы производился в диапазоне 100–800 Гц с шагом в 1 Гц. В эксперименте записанный с вибродатчиков сигнал был подвергнут узкополосной фильтрации, частотные полосы были взяты в диапазоне 100–800 Гц с шагом 1 Гц (всего 700 полос), ширина полосы при узкополосной фильтрации – 0,33 Гц. Подробная информация о критериях выбора ширины полосы будет представлена в главе 2. В данном случае ОСШ определялось как разница уровня сигнальных и шумовых собственных чисел корреляционной матрицы принятого сигнала в каждой частотной полосе в эксперименте и составляло, в зависимости от полосы, 40–75 дБ.

С целью определения влияния рассогласования модели и реальной конструкции на качество локализации проводились расчеты как с верифицированной, так и с неверифицированной КЭМ. Процедура доводки и верификации [42] производилась для улучшения соответствия КЭМ и реальной конструкции по данным эксперимента. Зависимость коэффициента передачи от частоты из точки возбуждения в одну из контрольных точек для верифицированной и неверифицированной модели и реальной конструкции приведена на рисунке 1.5.

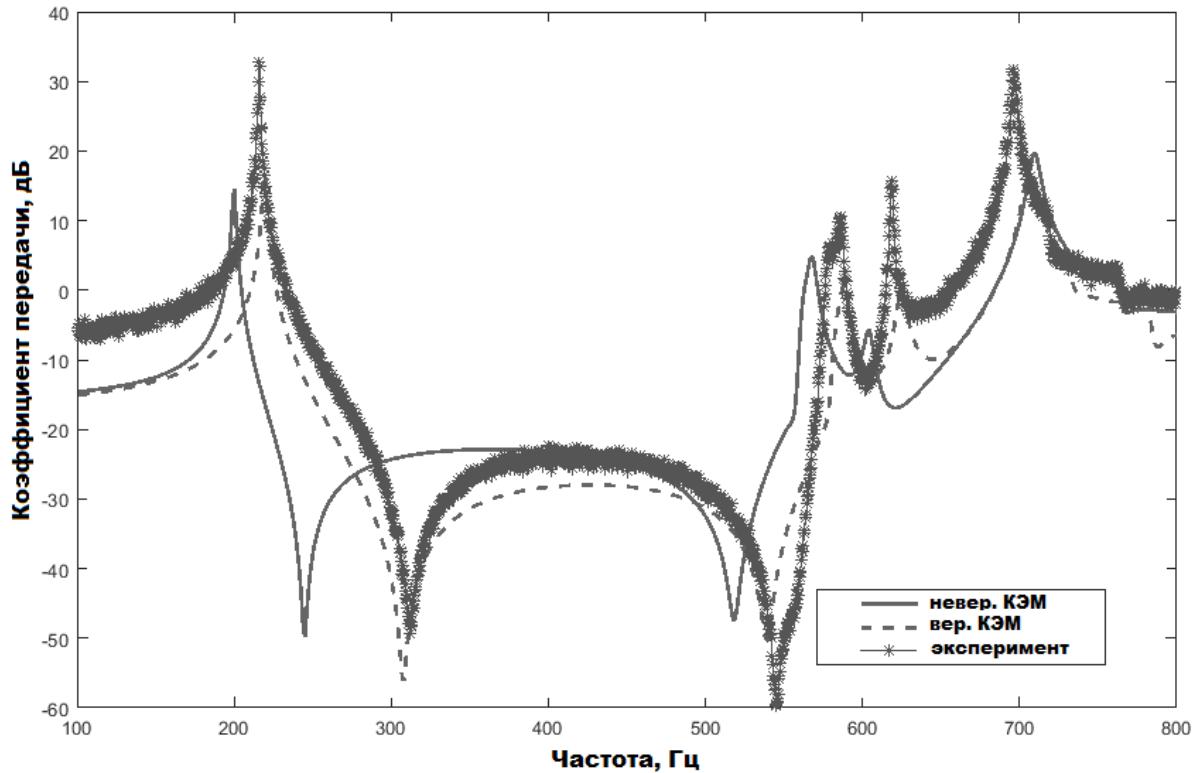


Рис. 1.5. Коэффициенты передачи из точки приложения силы в одну из контрольных точек для верифицированной и неверифицированной КЭМ и реальной конструкции в зависимости от частоты. Линией со звездами показаны экспериментальные значения коэффициента передачи, сплошной линией – коэффициенты передачи для неверифицированной КЭМ, пунктирной – для верифицированной. Первая конструкция

Результат имитационного моделирования методов (1.8), (1.11) для разных положений и разных ориентаций виброисточника приведен на рисунке 1.6. ОСШ считалось бесконечным, рассогласование между матрицами коэффициентов передачи не моделировалось, и в данном случае оценка положения источника совпадает с моделируемым положением.

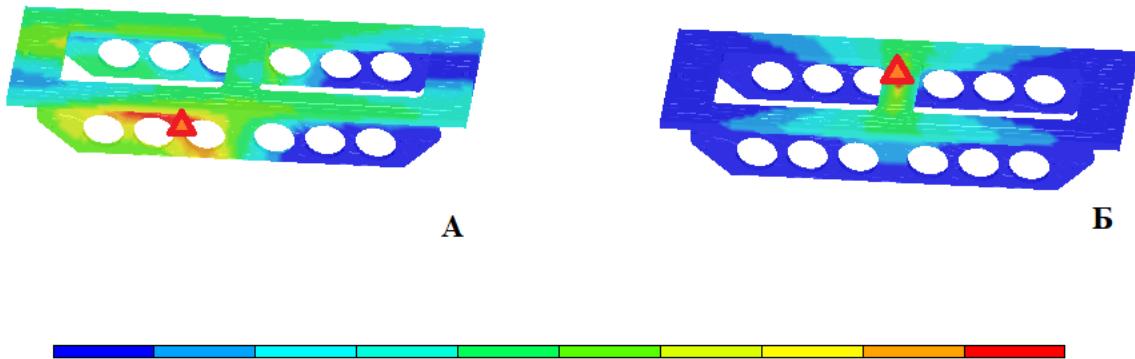


Рис. 1.6. Распределение целевых функций МНК(1.11) и МП(1.8), имитационное моделирование, установлены 22 вибродатчика, локализация единственного виброисточника. А – МНК (1.11), частота Гц, Б – МП(1.8), частота 334 Гц, отмечены максимумы целевых функций, положение максимумов совпадает с моделируемым положением

Результат экспериментальной локализации по методам (1.8) и (1.11) для разных положений источника и разных частот приведен на рисунке 1.7. Локализация производилась в одной частотной полосе, использовались разное количество вибродатчиков, разные положения источников и частотные полосы. Локализация в данном случае произведена успешно, ошибка не превышает 2–3 см.

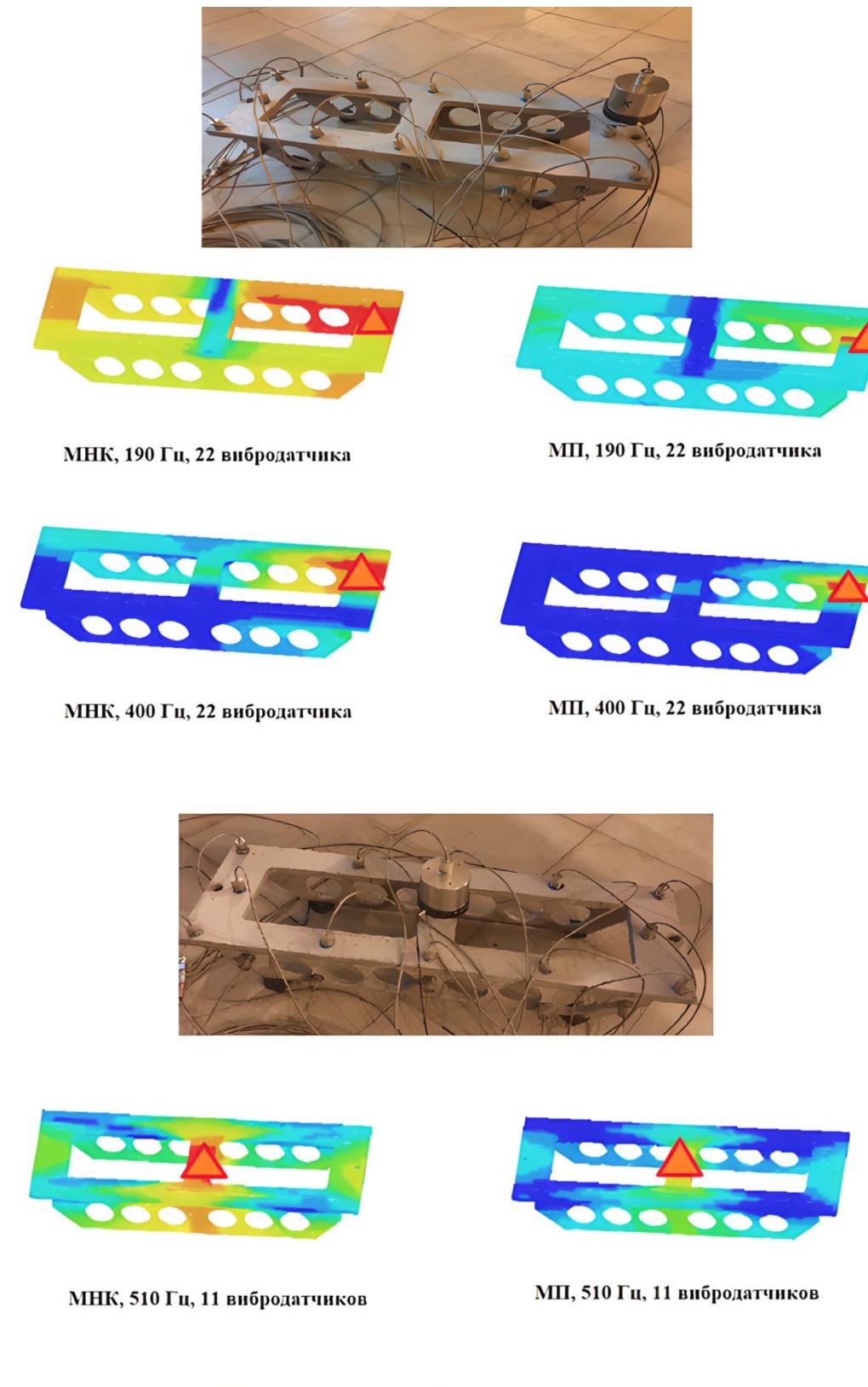


Рис. 1.7. Распределение целевых функций методов (1.11) и (1.8) локализация единственного виброисточника в единственной полосе при разных положениях, неверифицированная КЭМ

На рисунке 1.8 приведена зависимость ошибки локализации от частоты для двух положений виброисточника.

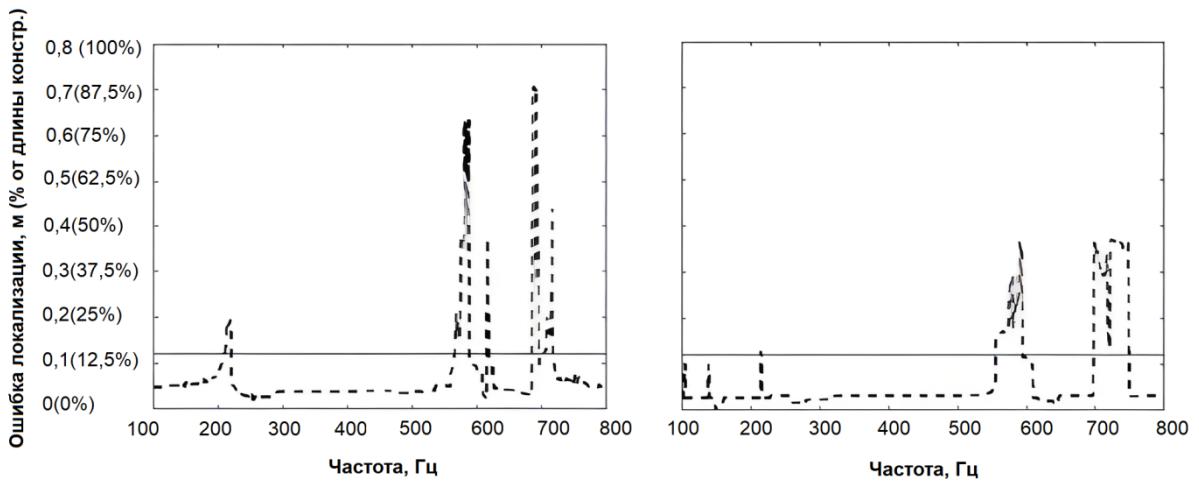


Рис. 1.8. Ошибка локализации (в метрах и процентах от длины конструкции) в зависимости от частоты в эксперименте, проведена локализация по МНК (1.11), установлено 22 вибродатчика (слева) и 11 вибродатчиков (справа), два разных положения источника (слева и справа). Чертой отмечен уровень ошибки 0,12 м, при ошибке выше, в данной полосе локализация считается неудачной (аномальная ошибка)².

Как видно из представленного графика, основные ошибки локализации возникают вблизи собственных частот конструкции (см. рисунок 1.5), т.к. в данном случае задача локализации является плохо обусловленной. Это связано с тем, что при любом воздействии возбуждается одна и та же форма колебаний. В данном случае в отсутствие априорной информации о мощности источника локализация становится некорректной задачей. При определенном удалении полосы анализа от собственных частот конструкции, и при наличии вклада нескольких собственных форм колебаний в результирующее колебание, результат локализации практически гарантированно будет хорошим. Напротив, при преобладании одной формы (как правило, такое происходит при приближении к

² Предельная величина ошибки выбиралась равной характерному пространственному размеру целевой функции локализации

одной из собственных частот) качество решения ухудшается. Ухудшение качества локализации вблизи собственных частот выражается в повышении количества неудачных полос (аномальная ошибка в данном эксперименте – это превышение уровня ошибки в 12 см). Пример неудачной локализации приведен на рисунке 1.9. В данном случае локализация производилась на частоте 210 Гц, и ошибка локализации составила десятки сантиметров. Заметим, что вся модель практически «раскрашена» в красный цвет, который соответствует высокому значению целевой функции (1.11) – коэффициент корреляции составляет ок. 0.95. То есть распределение вибрационного поля в данном случае является, фактически, инвариантом относительно положения источника.

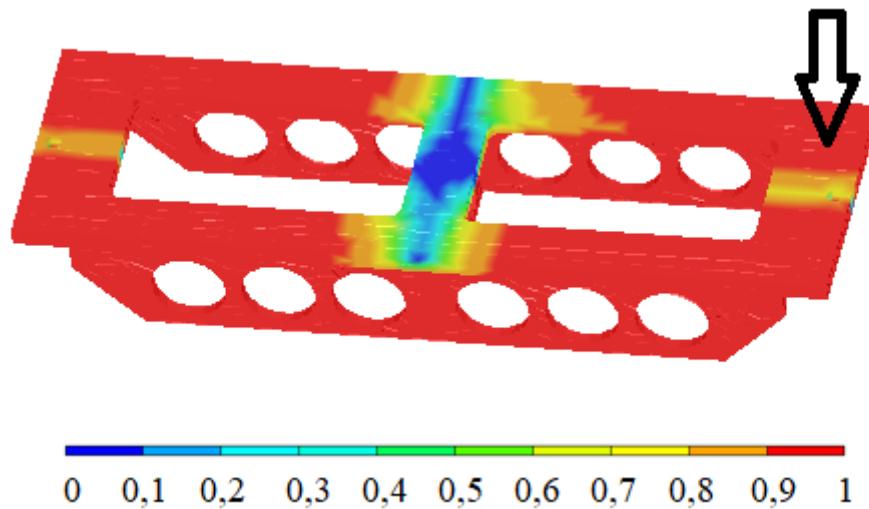


Рис. 1.9. Распределение целевой функции МНК на частоте 210 Гц в эксперименте, локализация единственного виброисточника. Пример неудачной локализации вблизи одной из собственных частот конструкции, т.к. в данном случае вибрационное поле является инвариантом относительно положения источника. Стрелкой отмечено реальное положение источника

На рисунке 1.10 приведены результаты суммирования функций 1.11 по 700 полосам для двух положений источника, использовалось 22 и 11 вибродатчиков соответственно. Следует отметить высокий уровень среднего коэффициента корреляции (более 0.9) в точке максимума, что говорит о хорошем согласовании модельных и экспериментальных данных.

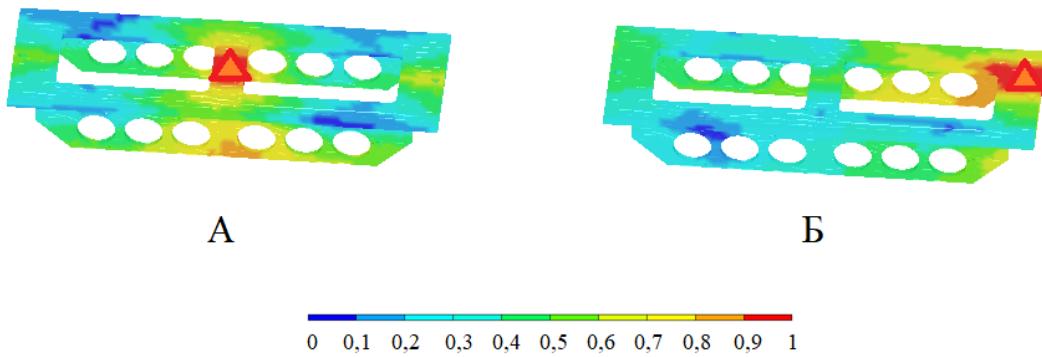


Рис. 1.10. Распределение целевой функции в эксперименте, локализация единственного виброисточника, суммирование (1.11) по всем полосам анализа, А – 11 вибродатчиков, Б – 22 вибродатчика

Относительно сравнения эффективности локализации верифицированной и неверифицированной КЭМ следует отметить, что существенная разница в качестве локализации проявляется только при значительном снижении числа датчиков. В одном из экспериментов локализация единственного источника проводилась по методу наименьших квадратов. Оценивалось количество полос, в которых успешно произведена локализация (когда ошибка менее 12 см), выбирались 10 случайных комбинаций из 5 датчиков. В среднем в случае верифицированной модели «успешными» оказались 326,7 полос, в случае неверифицированной – 252,2 полос. Зависимость ошибки локализации от частоты для одной из комбинаций с 5 датчиками приведена на рисунке 1.11.

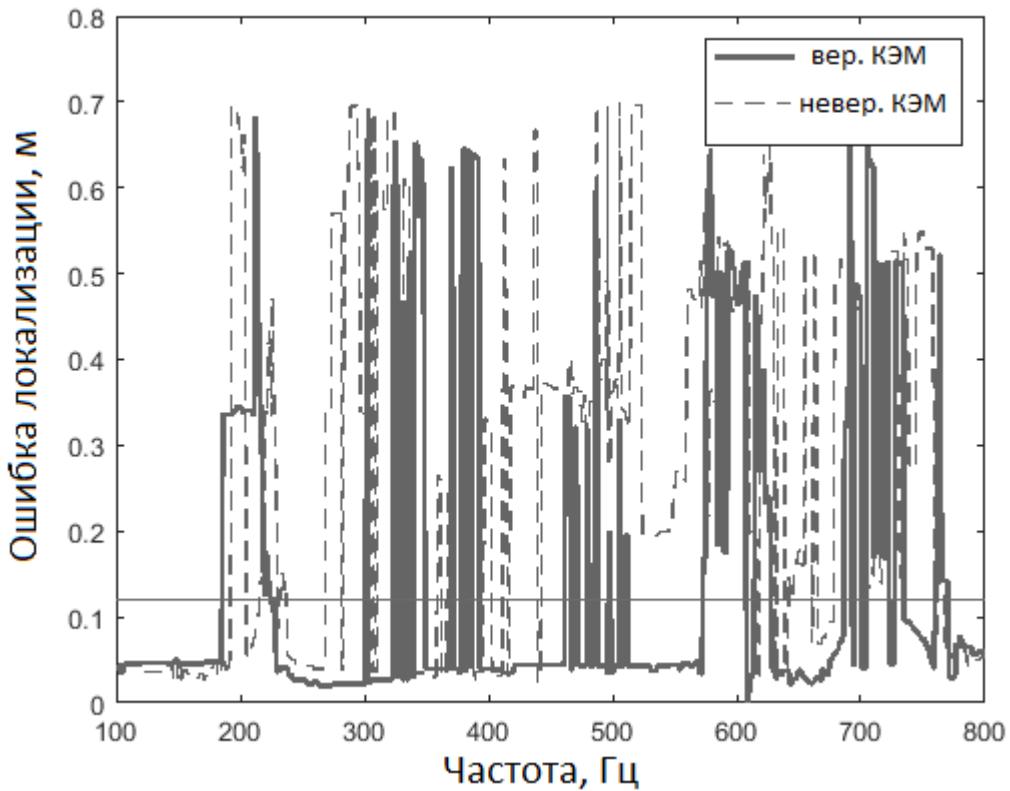


Рис. 1.11. Ошибка локализации единственного виброисточника в зависимости от частоты, МНК (1.11), одна из случайных комбинаций из 5 вибродатчиков. плотная кривая – верифицированная КЭМ, пунктирная – неверифицированная

Принципиальными преимуществами методов (1.8) и (1.11), в сравнении с ранее применявшимися методами (МНК без накопления), является возможность эффективного накопления вибрационного сигнала во времени, что особенно актуально при низком ОСШ. В эксперименте, результаты которого показаны выше, ОСШ в каждой полосе было достаточно высоким и главной причиной ошибок было рассогласование модели и конструкции, а также плохая обусловленность задачи вблизи собственных частот. В таком случае эффективную локализацию можно произвести и по одному отсчету (т.е. при $J=1$ в 1.1) – по короткому фрагменту реализации. Эффективность методов (1.8), (1.11) и МНК без накопления ($J=1$) в плане локализации источника в таком эксперименте практически одинакова.

Ситуация меняется при повышении уровня шума. Для сравнения эффективности методов (1.8), (1.11) и МНК без накопления (т.е. (1.11) для единичного отсчета) было проведено имитационное моделирование в диапазоне 100–200 Гц, в котором ОСШ было значительно ниже, чем в эксперименте, и не превышало нескольких дБ. В численном эксперименте использовалось 6 вибродатчиков, число временных отсчетов $J=20$, полезный сигнал представлял собой белый гауссов шум с нулевым средним. Количество удачных полос (без аномальной ошибки) приведено в таблице 1.1).

Таблица 1.1. Число удачных полос (из 100) для трех методов при локализации единственного виброисточника.

Метод максимума правдоподобия	Метод наименьших квадратов для первого собственного вектора	Метод наименьших квадратов для одного отсчета
55	48	24

Пример локализации на частоте 173 Гц приведен на рисунке 1.12.

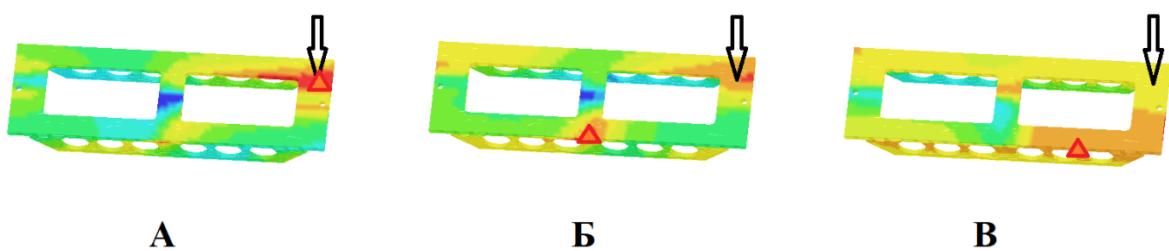


Рис. 1.12. Моделирование, локализация на частоте 173 Гц при низком ОСШ, А – МП (1.8), Б – МНК(1.11), В – МНК для $J=1$. Стрелкой отмечено моделируемое положение источника, треугольником – оценка по соответствующим методам

Как видно из рисунка 1.12, в данном случае разработанные методы обладают существенным преимуществом, причем метод максимума

правдоподобия (1.8) немного лучше, чем его упрощенная модификация – МНК для первого собственного вектора (1.11).

Интересно отметить, что и при высоком ОСШ метод (1.8) обладает некоторым преимуществом перед (1.11), но не в задаче локализации источника, а при оценке пространственной ориентации виброисточника (получаемой после локализации). В частотном диапазоне 700–800 Гц, где, как можно было видеть ранее, имелись наибольшее модельное рассогласование и наибольшие ошибки локализации единственного источника. При этом метод (1.11) определяет ориентацию \bar{F} с существенной погрешностью, вплоть до неправильного определения преобладающей³ оси, по которой направлена сила (в других частотных диапазонах оценка вектора \bar{F} более корректная). Метод (1.8) оказывается более устойчивым к рассогласованию. И хотя ошибки присутствуют и здесь, ось, на которую проекция силы \bar{F} наибольшая, определяется правильно. Соотношение мощности проекции \bar{F} на ось установки виброисточника P_{ocn} к сумме мощностей на другие оси P_{ocm} приведено на рисунке 1.13.

³ В экспериментах виброисточник устанавливался вдоль одной из осей

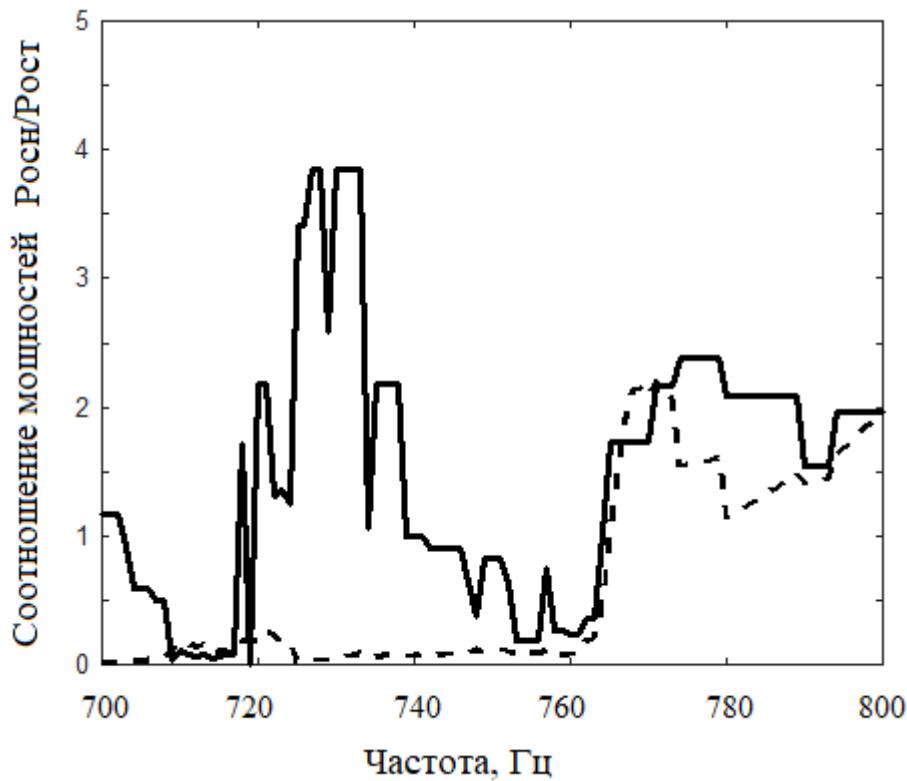


Рис. 1.13. Экспериментальная зависимость соотношения P_{och} / P_{osc} от частоты, толстой линией – МП (1.8), пунктиром – МНК(1.11)

Отметим, что подобное преимущество метода максимума правдоподобия связано с тем, что он является оптимальным и использует всю информацию о сигнале, в отличие от метода наименьших квадратов (1.11).

Также проведена экспериментальная апробация методов на другой, более сложной механоакустической конструкции. Вторая конструкция содержит около 10^5 узлов и имеет характерный масштаб 1 метр. На рисунках 1.14–1.16 приведены фрагменты механоакустической конструкции с результатами локализации широкополосного виброисточника по методу наименьших квадратов и методу максимума правдоподобия. Белые стрелки обозначают оценочное положение виброисточника, черные – реальное. При получении результатов производилось суммирование целевых функций, полученных для разных частотных полос. Использовалось разное количество вибродатчиков и частотных полос. Возбуждение производилось в диапазоне 50–2400 Гц. Как и в случае с первой

конструкцией, мощность полезного сигнала в эксперименте со второй конструкцией превосходила мощность шума (ОСШ составляло 40–80 дБ). Использовалась верифицированная КЭМ (пример коэффициентов передачи после верификации приведен на рисунке 1.2).

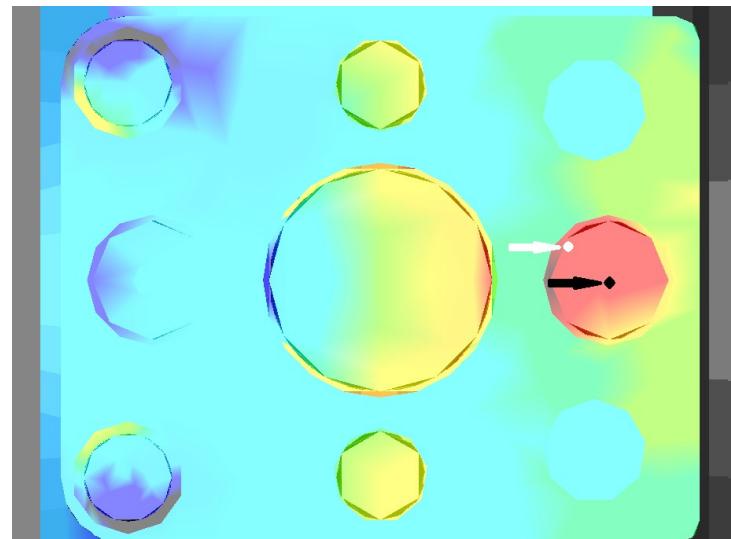


Рис. 1.14. Распределение целевой функции, МНК (черным цветом – реальное положение источника, белым – оценка), суммирование по 82 частотным полосам, число датчиков – 55. Вторая конструкция

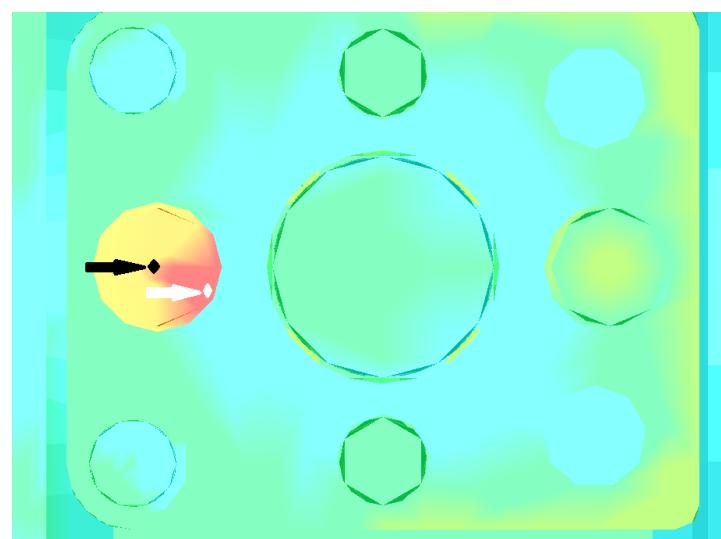


Рис. 1.15. Распределение целевой функции, МНК, суммирование по 50 частотным полосам, число датчиков – 61. Вторая конструкция

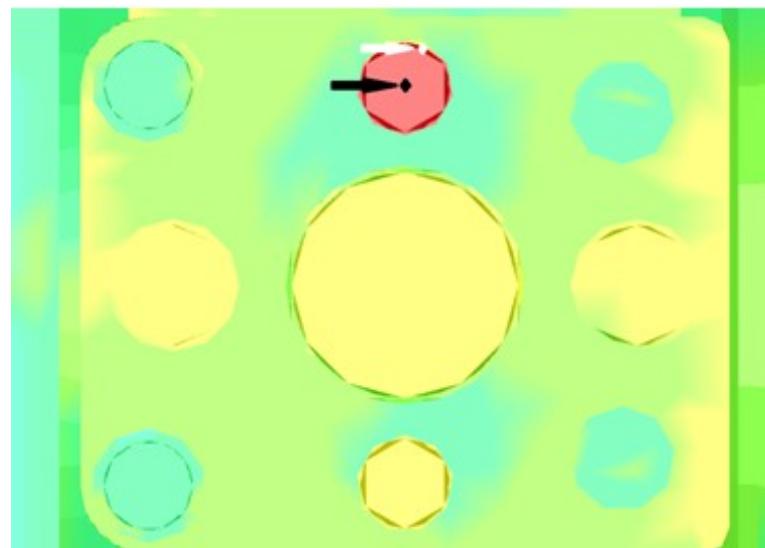


Рис. 1.16. Распределение целевой функции по методу МП, суммирование по 41 частотной полосе, число датчиков – 61. Вторая конструкция

На рисунке 1.17 приведен результат локализации тонального виброисточника, излучавшего сигнал на частоте 100 Гц. Для локализации использовался метод (1.11), расчет производился в одной частотной полосе. Отметим, что при локализации тонального источника можно брать не первый собственный вектор, а производить усреднение экспериментального сигнала по отсчетам.

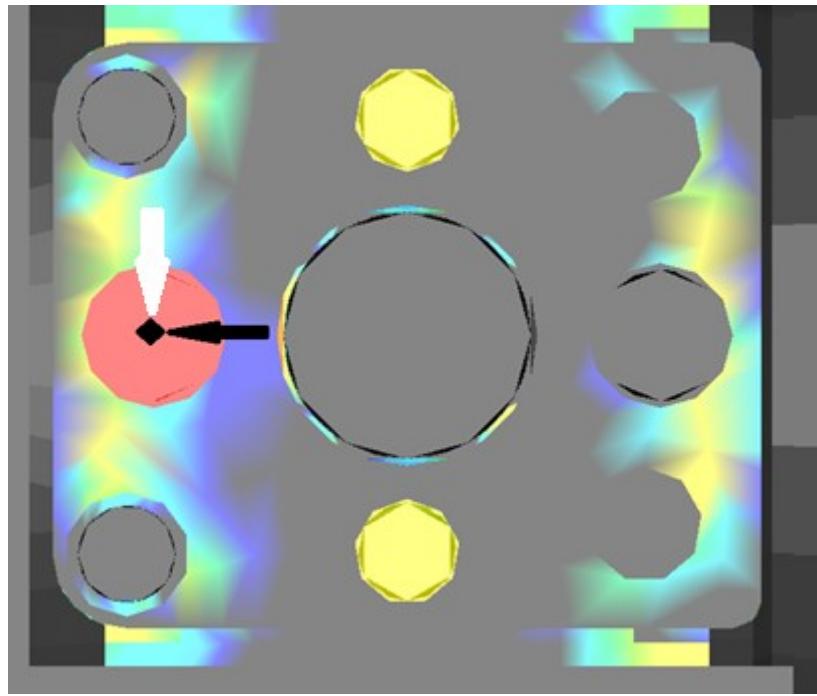


Рис. 1.17. Распределение целевой функции по методу наименьших квадратов (1.11) на частоте 100 Гц, установлено 50 вибродатчиков. Вторая конструкция

Другим практически важным вопросом является влияние суммирования целевых функций разных частотных полос на качество итогового результата. Как отмечено ранее, оценка локализации в одной частотной полосе зачастую не приводит к удовлетворительному результату. На рисунке 1.18 для одного из положений источника представлен график зависимости средней ошибки локализации от числа частотных полос. Каждая точка графика – это средняя ошибка локализации при заданном количестве полос n_{fr} ; для расчета значения средней ошибки локализации использовалось 100 наборов по n_{fr} случайно выбранных полос в диапазоне от 100 до 600 Гц (из общего рассчитанного набора в 45 полос). Для каждого набора суммировались n_{fr} значений целевой функции, после чего производился расчет средней по всем наборам ошибки локализации. Как видно из приведенного графика, суммирование целевых функций по набору из частотных полос дает существенное улучшение результата локализации.

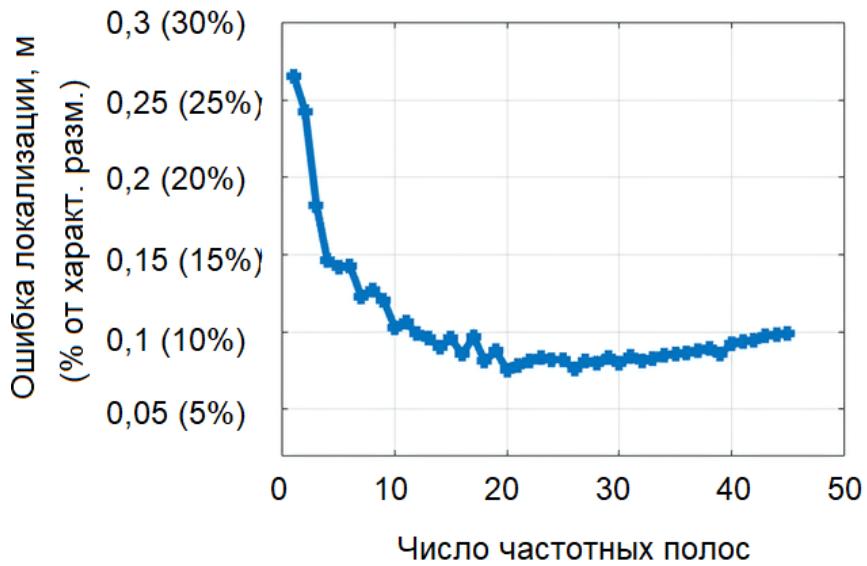


Рис. 1.18. Ошибка локализации в метрах и процентах от характерного размера в зависимости от числа частотных полос, по которым проводится суммирование целевых функций (1.11)

1.5 Оценка числа вибродатчиков и частотных полос, необходимых для успешной локализации

При экспериментальной апробации была выполнена также оценка количества датчиков, необходимого для успешной локализации виброисточника. На второй механоакустической конструкции виброисточник был установлен в 2х положениях. Производился расчет целевой функции метода наименьших квадратов для 28 частотных полос при разном количестве используемых при расчете вибродатчиков: по 18 случайным комбинациям из 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 датчиков. Для каждой комбинации оценивалась вероятность того, что оценочное положение виброисточника находится за пределами соответствующей детали составной конструкции⁴. Целевая функция при этом рассчитывалась для заданного количества полос (полосы выбирались случайно из общего набора в 28 полос). Целевые функции, полученные для разных частотных полос и одной

⁴ Такое положение будем считать аномальной ошибкой локализации

комбинации вибродатчиков, суммировались. Зависимости для 2-х положений источника приведены на рисунке 1.19 (А и Б соответственно). Для каждого числа вибродатчиков (от 10 до 50) произведено усреднение вероятности аномальной ошибки по 18 комбинациям. Расчеты для комбинаций из 30 и 40 датчиков приведены на рисунках 1.20 и 1.21.

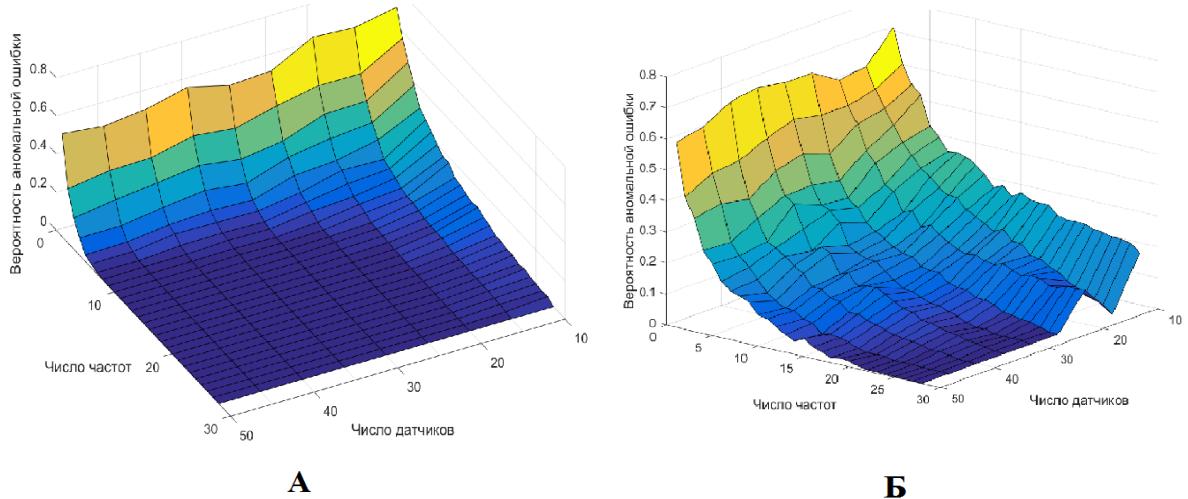


Рис. 1.19. Вероятность аномальной ошибки от числа частот и датчиков при локализации единственного источника, для двух положений единственного источника (А и Б)

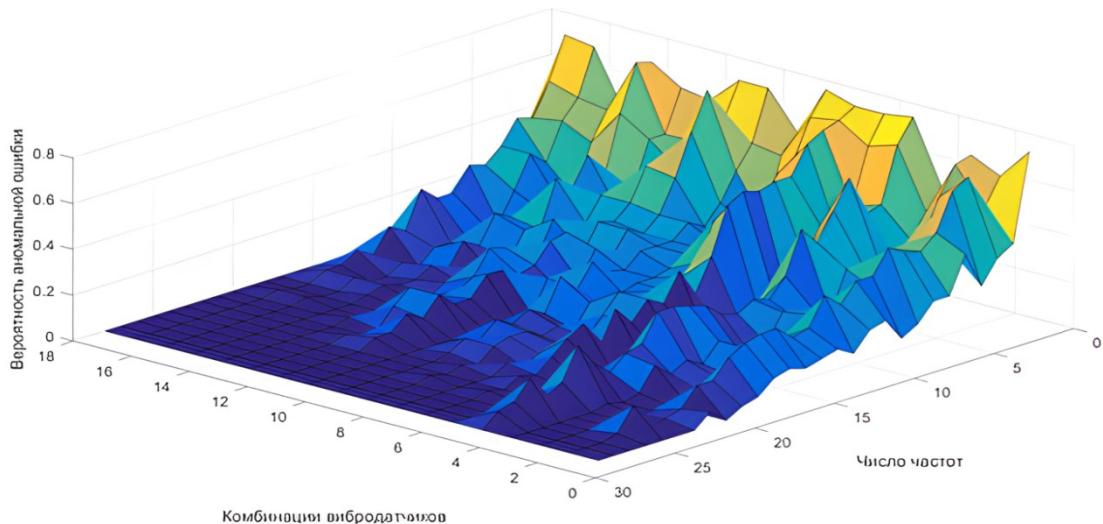


Рис. 1.20. Вероятность аномальной ошибки при разном числе частот и разных комбинациях вибродатчиков (30 датчиков)

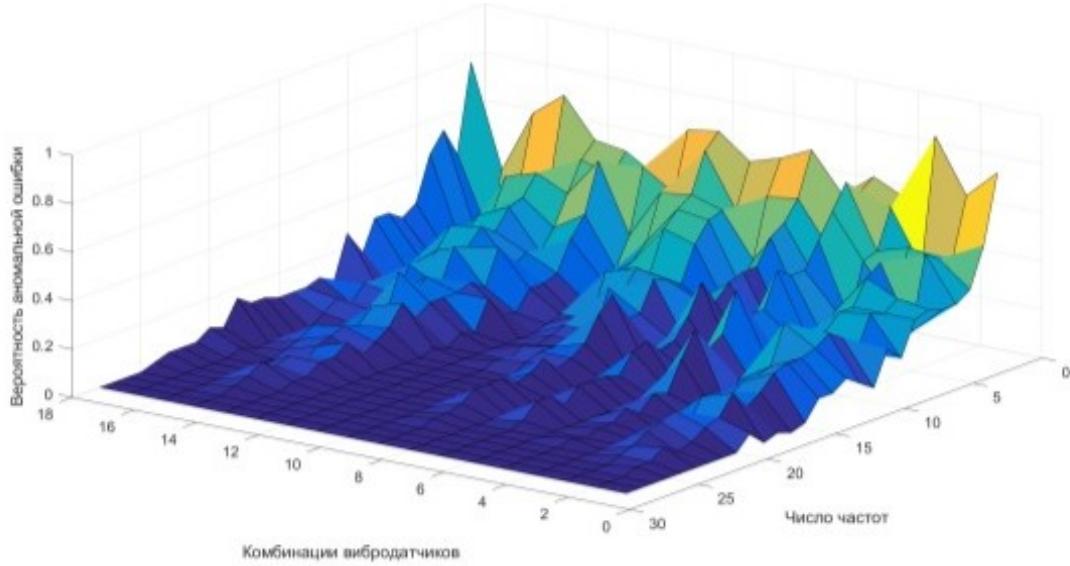


Рис. 1.21. Вероятность аномальной ошибки при разном числе частот и разных комбинациях вибродатчиков (40 датчиков)

Из результатов эксперимента видно, что уже при 10–15 датчиках и 20 частотах вероятность аномальной ошибки при локализации становится практически нулевой.

1.6 Реализация процедуры локализации виброисточников в программном обеспечении «САТЕС»

В ИПФ РАН в рамках соответствующего проекта, просубсидированного Министерством промышленности и торговли Российской Федерации, было разработано ПО «САТЕС», реализующее возможности решения задач акустического проектирования и диагностики техники [69]. При акустической доводке конструкций часто возникает задача локализации виброисточников. Для этой цели в состав ПО «САТЕС» входит модуль «Поиск источника». В модуле приведена информация о КЭМ, экспериментальном файле, выбирается метод локализации и частотный диапазон. Данные для модуля поиска передаются из других модулей (см. рисунок 1.22), отвечающих за формирование информации о

модели (КЭМ, функции коэффициентов передачи) и обработку экспериментальных данных (модуль «Эксперимент»).

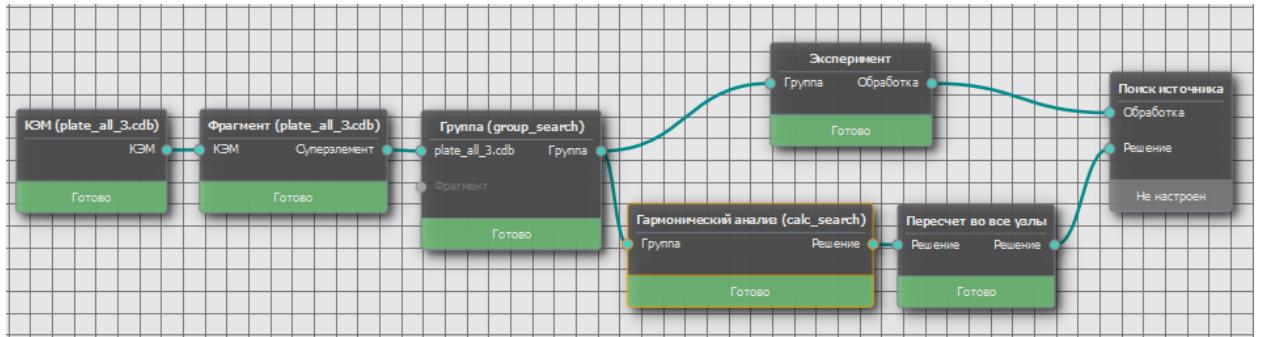


Рис. 1.22 Пример создания цепочки вызовов функций для модуля «Поиск источника» в ПО «CATEC»

Поиск источников возможен с использованием следующих методов:

- метод наименьших квадратов;
- метод максимума правдоподобия;
- метод MUSIC (описание метода будет приведено в главе 2).

Локализация источников возможна как в отдельной выбранной полосе, так и в наборе полос в задаваемом диапазоне частот (целевые функции методов при этом суммируются). Результат поиска и координаты источника отображаются в соответствующем окне. Пример реализации поиска единственного виброисточника по методу максимума правдоподобия для пластины приведен на рисунке 1.23.

В совокупности с данными реальных измерений использование численных моделей и встроенных в ПО «CATEC» алгоритмов позволяет с высокой точностью осуществить решение задач о локализации зон повышенной вибрации.

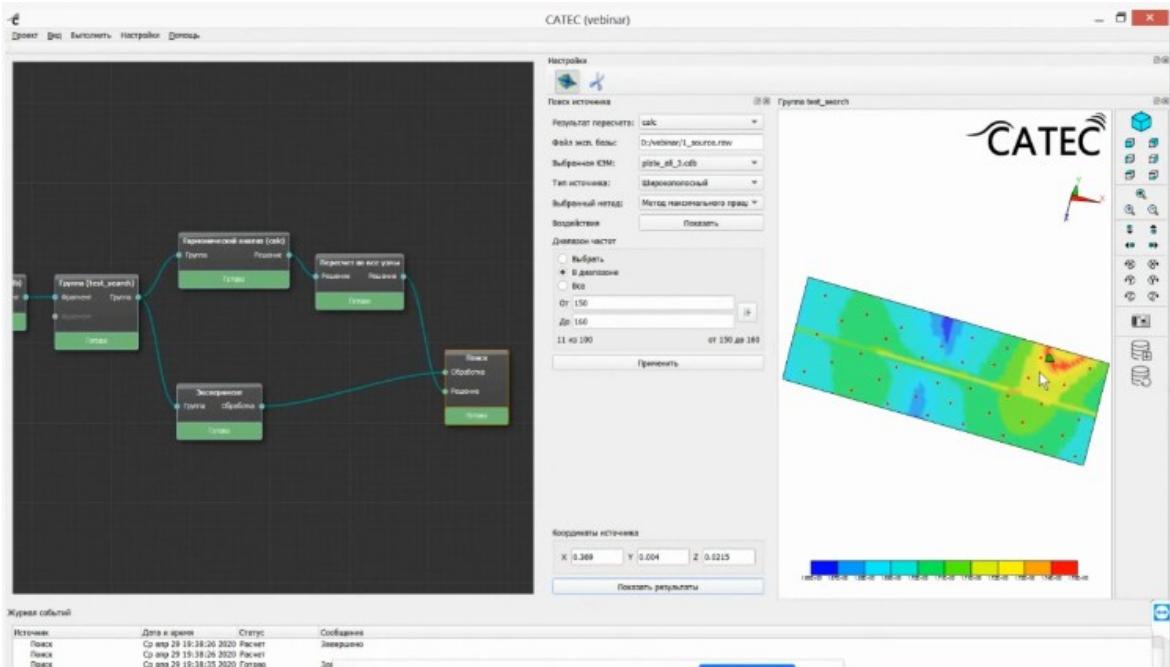


Рис. 1.23. Метод МП при локализации источника, модуль «Поиск источника»

1.7 Заключение по первой главе

В данной главе рассмотрена задача локализации единственного виброисточника. Разработаны два метода локализации единственного виброисточника – локализация по методу максимума правдоподобия и по методу наименьших квадратов, применяемому к первому собственному вектору выборочной корреляционной матрицы сигнала. Проведены численное моделирование и экспериментальная апробация данных методов на механоакустических конструкциях с большим числом узлов (10^4 – 10^5). Методы показали свою эффективность с использованием как верифицированной, так неверифицированной КЭМ. При низком отношении сигнал/шум данные методы являются существенно более эффективными по сравнению с методами локализации без временного накопления, применявшимися ранее. Метод максимума правдоподобия является более эффективным по сравнению с методом наименьших квадратов, применяемому к первому собственному вектору, при низком отношении сигнал/шум. При этом, при высоком отношении сигнал/шум, метод максимума правдоподобия дает более точную оценку вектора силы

виброисточника, хотя в данном случае ошибки локализации практически не отличаются. Произведены оценки необходимого числа вибродатчиков и частотных полос, необходимых для заданных средних ошибок локализации. Показано, что суммирование целевых функций по частотным полосам при поиске широкополосного источника позволяет значительно уменьшить ошибку локализации. Результаты исследования легли в основу модуля локализации виброисточника в ПО «САТЕС», предназначенном для решения задач акустического проектирования и диагностики техники.

ГЛАВА 2. Локализация нескольких источников вибрации с помощью модификации метода MUSIC

Во второй главе диссертации рассмотрена задача локализации и определения числа одновременно работающих виброисточников. В имеющихся публикациях редко рассматривается постановка задачи локализации, когда в конструкции одновременно расположены несколько виброисточников. В ряде работ (например, [38], [71]) рассматриваются вопросы обработки вибрационных сигналов при наличии нескольких источников (правда, основное внимание уделено реконструкции временной формы воздействий, а не локализации). Зачастую при отсутствии априорных ограничений на число или возможные положения источников задача локализации является некорректной [72]. В большинстве случаев авторы рассматривают задачу локализации с принципиальным требованием единственности источника (например, [39]). Отметим, что при решении задачи реконструкции временной формы воздействий существенной проблемой является неточное знание местоположения виброисточников. В совокупности с рассогласованием между моделью и реальной конструкцией это приводит к некорректному результату и необходимости применения сложных регуляризационных техник [71]. Возникает необходимость создания метода определения числа и местоположения одновременно работающих виброисточников.

Выражения (1.8) и (1.11) для методов наименьших квадратов и максимума правдоподобия, полученные в предположении единственного источника, в некоторых случаях можно использовать для локализации нескольких источников (например, когда источники создают слабо коррелированное пространственное распределение на вибродатчиках). Однако, такая ситуация является скорее исключением, а поиск строгого решения задачи с несколькими источниками представляет собой весьма непростую проблему. Дело в том, что для строгого решения задачи с M источниками по методу наименьших квадратов нужен

полный перебор по меньшей мере в $3M$ -мерном пространстве. Это неприемлемо с вычислительной точки зрения, и поэтому необходимо принципиально другое решение. В рамках настоящей работы разработан метод локализации нескольких виброисточников, основанный на модификации метода MUSIC, используемого в задачах спектрального анализа и пеленгации источников плоских волн. При этом число источников определяется по спектру собственных чисел выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала. Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [60,61,63–66,69].

2.1 Модифицированный метод MUSIC для поиска нескольких виброисточников

Метод сверхразрешения MUSIC, возникший при решении задач спектрального оценивания, часто используется в задачах пеленгации для разрешения близких источников волновых полей. Такая ситуация может возникнуть, когда, к примеру, источники волнового поля расположены в дальней зоне линейной антенной решетки в пределах главного лепестка диаграммы направленности. Общепринятое выражение для целевой функции метода MUSIC в таких задачах выглядит следующим образом [73]:

$$F_{music}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})}{\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})}. \quad (2.1)$$

где $\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})$ – вектор направлений (steering vector) для данной задачи,

$\mathbf{U} \mathbf{U}^H = \sum_{l=L+1}^K \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H$, \mathbf{u}_l – собственные векторы выборочной корреляционной матрицы

принятого сигнала $\hat{\mathbf{K}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^H$, L – параметр метода MUSIC (должен быть

больше или равен общему числу источников M), \mathbf{v}_j – вектор принятого сигнала на частоте f_0 в момент времени с номером $j = 1 \dots J$. Можно считать, что в условиях нашей задачи аналогом вектора направлений $\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})$ является вектор \mathbf{A}

\mathbf{F} , который является функцией коэффициентов передачи для задачи локализации виброисточника. Учитывая это, запишем выражение для модификации целевой функции метода MUSIC для задачи локализации виброисточников:

$$F_{music+}(x, y, z) = \frac{\mathbf{F}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{F}}{\mathbf{F}^H \mathbf{A}^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A} \mathbf{F}}. \quad (2.2)$$

Для поиска неизвестных параметров необходимо максимизировать выражение (2.2) по этим параметрам. Для параметра \mathbf{F} это легко сделать путем решения уравнения $\frac{\partial F_{music+}}{\partial \mathbf{F}} = 0$. После подстановки найденного решения в (2.2) получим новую целевую функцию:

$$F_{MUS+}(x, y, z) = \lambda_{MUS}^{-1}, \quad (2.3)$$

где λ_{MUS} – минимальное собственное число матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A}$.

Алгоритм (2.3) обладает гораздо меньшей вычислительной сложностью, чем алгоритм полного перебора по методу наименьших квадратов для нескольких источников. Размерность матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A}$ – 3x3, и время решения обратной задачи для M источников сопоставимо со временем решения обратной задачи по методу наименьших квадратов для одного источника. Кроме того, целевые функции (2.3) для разных частот, также как и целевые функции метода наименьших квадратов, можно суммировать для улучшения качества итогового результата.

Скажем здесь несколько слов по поводу определения числа источников M . Известно, что спектр собственных чисел корреляционной матрицы случайного процесса для рассматриваемой модели можно условно разделить на так называемые «сигнальные» и «шумовые» собственные числа. Количество «сигнальных» собственных чисел равно количеству источников, а их абсолютные значения выше абсолютных значений шумовых чисел (при достаточно большом отношении сигнал/шум). При этом не составляет труда найти сильно выделяющиеся по абсолютным значениям собственные числа корреляционной матрицы; их количество равно количеству источников M . То есть в данном случае

задача определения параметра метода MUSIC легко решается (для этого можно использовать, например, пороговую технику).

Стоит отметить, что, в отличие от задачи разрешения источника волновых полей (где существуют характерные пространственные масштабы, например, такие как λ/D), в рассматриваемой задаче методы сверхразрешения нужны и в случае сильного пространственного разнесения источников, поскольку источники могут быть сильно пространственно коррелированы и на большом удалении.

2.2 Экспериментальная апробация и численное моделирование предложенного алгоритма локализации виброисточников

Для исследования эффективности предложенной модификации метода MUSIC были проведены численное моделирование и эксперименты с двумя механическими конструкциями. Сначала приведем результаты для первой конструкции (упомянутой ранее, см. рисунок 1.4). В экспериментах в качестве вибродатчиков использовались пьезоэлектрические акселерометры, установленные в контрольных точках модели и подключенные к системе сбора данных. Каждый из акселерометров был ориентирован по одной из осей x , y или z , по нормали к поверхности модели. В эксперименте с первой конструкцией всего было установлено 24 акселерометра: 22 на модели и 2 на виброисточниках (для контроля мощности). Эксперимент проводился при двух разных положениях пары виброисточников, излучавших одновременно широкополосный белый гауссовский шум в диапазоне 100–800 Гц (условно положение I и положение II – см. рисунок 2.3). В положении I мощность виброисточников во всем диапазоне излучаемого сигнала была одинаковой, а в положении II мощность во всем диапазоне одного из источников была выше примерно на 3,5 дБ. Сигнал на виброисточники подавался на протяжении приблизительно 2-х мин. Записанный с вибродатчиков сигнал был подвергнут узкополосной фильтрации, частотные полосы были взяты в диапазоне 100–800 Гц с шагом 1 Гц. Всего использовалось 700 полос, ширина полосы при узкополосной фильтрации составляла 0,33 Гц.

Численный расчет модельной матрицы \mathbf{A} производился с использованием верифицированной и неверифицированной КЭМ в диапазоне 100–800 Гц с шагом в 1 Гц. Зависимость коэффициентов передачи от частоты из точки возбуждения в одну из контрольных точек для верифицированной/неверифицированной модели и реальной конструкции приведена на рисунке 1.5.

Расчет целевой функции в каждой узкой частотной полосе для метода MUSIC производился по формуле (2.3), для метода наименьших квадратов – по (1.11). В данном случае сравнение велось с МНК, рассчитанном на единственный виброисточник (как уже отмечалось ранее, расчет в предположении полного числа источников является вычислительно сложным). Определение качества локализации виброисточников производилось при помощи оценки вероятности правильного разрешения. Считалось, что источники в данной полосе разрешены, если глобальный максимум целевой функции расположен вблизи реального положения одного из источников – в области близлежащих узлов (сфере радиуса 12 см), а при исключении данной области глобальный максимум будет располагаться в области близколежащих узлов другого источника. Вначале было проведено численное моделирование локализации двух виброисточников. Моделировался случай использования всех 22х вибродатчиков, установленных на реальной конструкции. Мощность источников была одинаковой, использовалась верифицированная КЭМ, ОСШ считалось бесконечным. Моделирование показало, что при взаимном положении виброисточников I метод MUSIC разрешает источники во всех 700 частотных полосах, МНК только в 131 полосе. При положении II MUSIC также разрешил все источники во всех 700 частотных полосах, МНК – только в 1 полосе. Оказалось, что при численном моделировании метод MUSIC не дает «осечек», то есть разрешает источники во всех ситуациях. Данный факт объясняется тем, что при высоком отношении сигнал/шум и отсутствии рассогласования модели и конструкции функции коэффициентов передачи метод MUSIC может разрешить любую невырожденную взаимную конфигурацию источников. Под невырожденной конфигурацией мы имеем в виду такие положения, для которых функции коэффициентов передачи от отдельных

источников значимо различаются. При этом МНК, рассчитанный на единственный источник, в подавляющем большинстве случаев не даёт разрешения. Это говорит о значительной пространственной корреляции источников.

Необходимо сказать о критериях выбора ширины полосы. Ширина полосы фильтра узкополосной фильтрации определяет вид спектра собственных чисел корреляционной матрицы. При недостаточно узкой полосе обработки (за счет попадания в полосу двух отличающихся форм пространственных колебаний) могут появиться лишние «сигнальные» собственные числа. В этой ситуации правильная оценка числа «сигнальных» собственных чисел и числа источников становится невозможной. Требования к ширине полосы определяются изменчивостью амплитуды и фазы функции коэффициентов передачи вблизи данной центральной частоты. Т.е., по сути, количеством, частотой и пространственной конфигурацией мод, вносящих существенный вклад в функцию коэффициентов передачи на рассматриваемой частоте. На эту изменчивость влияют взаимное расположение датчиков и источников, мощности источников и вектор приложения силы. Аналитическое или численное определение необходимой ширины полосы обработки представляется затруднительным. При наличии нескольких источников соотношение вклада мод в результирующее колебание различно. При нахождении одной из сил в узле одной из мод данная мода вообще не вносит вклад в колебание. При этом вторая сила, находящаяся в другой точке, может возбуждать данную моду. Соответственно, частотная изменчивость результирующего отклика зависит от взаимного расположения источников и не может быть оценена в аналитике. Вместе с тем численный расчет для конструкции с перебором всех возможных положений источников может дать верхнюю границу ширины полосы. Это будет такая ширина полосы, которая удовлетворяет всем возможным положениям. Однако, использовать данную оценку нецелесообразно не только из-за вычислительных затрат на проведение такого расчета, но и из-за того что, использование подобной ширины полосы снизит размер эффективной временной выборки и может привести к

существенному понижению ОСШ. Максимально допустимая ширина полосы может быть определена экспериментально. Для этого необходимо уменьшать ширину полосы фильтрации до тех пор, пока вид спектра собственных чисел прекратит изменяться. Подобное поведение спектра собственных чисел проиллюстрировано на рисунке 2.1,А. На нем для записи с двумя источниками представлены спектры собственных чисел корреляционной матрицы на разных частотах. Для разных ширин полос (от 0,17 до 1 Гц) сверху представлены спектры на центральной частоте 410 Гц, снизу – на частоте 693 Гц. Частота 693 Гц находится вблизи одной из мод конструкции (в отличие от частоты 410 Гц), и вблизи этой частоты функция коэффициентов передачи более изменчива (см. рисунок 1.5 с приведенными функциями коэффициентов передачи). Можно отметить, что при частоте 410 Гц количество сигнальных собственных чисел определяется уже при ширине полосы обработки в 1 Гц, а при частоте 693 Гц – только при 0,33 Гц. При дальнейшем уменьшении ширины полосы виды спектра собственных чисел не претерпевают изменений. На рисунке 2.1,Б представлен спектр собственных чисел для случая одного виброисточника. Видно, что число «сигнальных» собственных чисел равно числу источников.

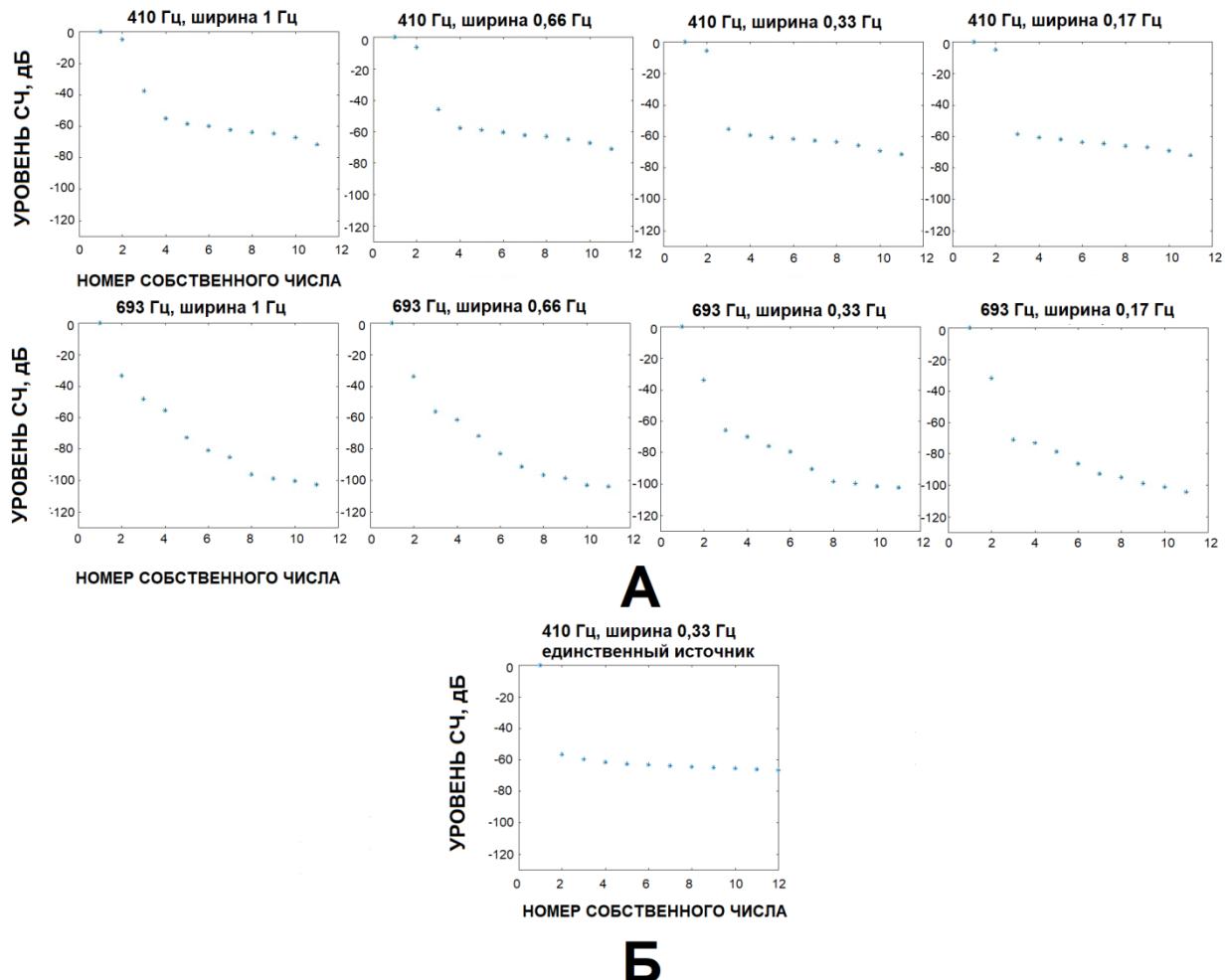


Рис. 2.1. Экспериментальные спектры собственных чисел корреляционной матрицы принятого сигнала. А – спектры собственных чисел корреляционной матрицы на разных частотах при разных ширинах полос, запись с двумя источниками. Сверху представлены спектры для центральной полосы 410 Гц, снизу – 693 Гц. Б – спектр собственных чисел для единственного виброясточника

Далее проводилась локализация источников. Расчет целевых функций методов MUSIC и наименьших квадратов, а также оценка эффективности разрешения, были произведены для 18 комбинаций из 16 датчиков (взятых случайно из общего количества в 22 датчика). Локализация выполнена как для верифицированной, так и неверифицированной КЭМ для обоих взаимных положений виброясточников. Комбинации вибродатчиков во всех случаях брались одинаковые.

В таблицах 2.1 (положение I) и 2.2 (положение II) приведено количество полос, в которых выполнена успешная локализация виброисточников для всех комбинаций датчиков. Из таблицы 2.1 и 2.2 видно, что метод MUSIC позволяет значительно лучше разрешать виброисточники в сравнении с методом наименьших квадратов.

Таблица 2.1. Количество полос (из общего числа в 700), в которых успешно произведено разрешение виброисточников методами наименьших квадратов и MUSIC. Приведен результат для положения I в случае использования верифицированной и неверифицированной КЭМ. Представлена статистика для 18 комбинаций из 16 датчиков.

	Минимальное число полос, в которых произведено разрешение	Максимальное число полос, в которых произведено разрешение	Среднее число полос, в которых произведено разрешение
MUS/Невер	194	527	369,3
МНК/Невер	66	244	135,4
MUS/Вер	275	511	403,3
МНК/Вер	73	212	150,9

Таблица 2.2. То же самое, что и в Таблице 2.1, только для положения II

	Минимальное число полос, в которых произведено разрешение	Максимальное число полос, в которых произведено разрешение	Среднее число полос, в которых произведено разрешение
MUS/Невер	286	521	413,3
МНК/Неве	48	208	97,2
MUS/Вер	198	481	367,8
МНК/Вер	27	178	85

Так, в случае неверифицированной КЭМ число успешно разрешенных полос в 2,7 раз больше для MUSIC для первого положения источников и в 4,2 раза

больше для второго положения. В случае верифицированной КЭМ число успешно разрешенных полос в 2,7 раз больше для MUSIC для первого положения источников и в 4,3 раза больше для второго. В отличие от задачи локализации единственного виброисточника, в задаче локализации двух виброисточников в данном эксперименте доводка КЭМ не смогла продемонстрировать преимущество в локализации. Как показало исследование, предложенный алгоритм оказывается достаточно устойчивым даже к существенному рассогласованию между моделью и реальной конструкцией. Характерные примеры локализации виброисточников, выполненной обоими методами, приведены на рисунке 2.2.

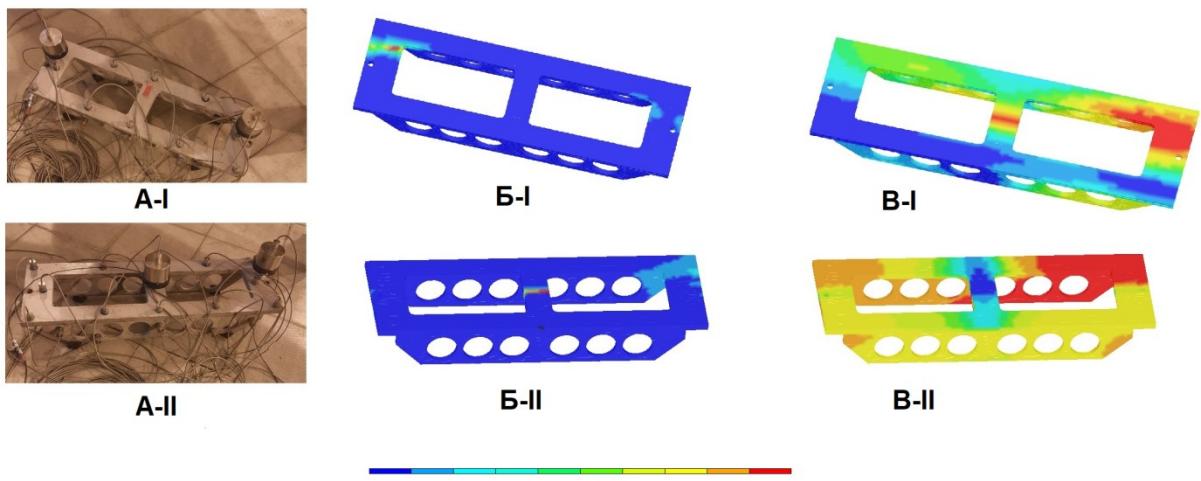


Рис. 2.2. Слева показано два взаимных расположения виброисточников на исследуемой конструкции: положение I (A-I) и положение II (A-II). Справа показано распределение целевых функций для двух положений и двух методов локализации: Б-I – метод MUSIC с частотой 450 Гц (положение I), В-I – МНК с частотой 450 Гц (положение I); Б-II - метод MUSIC с частотой 200 Гц (положение II), В-II – МНК с частотой 200 Гц (положение II). Эксперимент с первой конструкцией

Относительно причин ошибок локализации источников стоит отметить, что большая часть ошибок возникает вблизи собственных частот конструкции, так как в данном случае задача локализации является плохо обусловленной. Это связано с тем, что при любом воздействии возбуждается одна и та же форма колебаний. На рисунке 2.3 представлены значения индикаторной функции

(источники разрешены или неразрешены) для каждой частотной полосы для обоих методов с использованием верифицированной КЭМ.

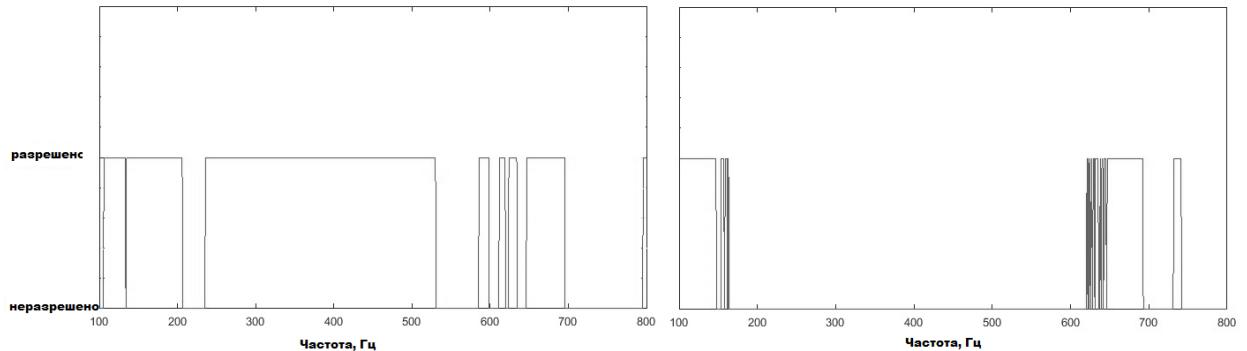


Рис. 2.3. Индикаторная функция разрешения двух виброисточников в зависимости от частоты для положения II в эксперименте с первой конструкцией. Слева – MUSIC, справа – MNK

Из рисунка 2.3 видно, что метод MUSIC выдал ложный результат в полосах вблизи 219 Гц (одна из собственных частот модели), между 700 и 800 Гц, и около 600 Гц – в этих диапазонах присутствует несколько собственных частот. Также видно, что, как и в эксперименте с одним источником, наилучшей ситуацией для эффективного решения задачи локализации виброисточников является определенное удаление частоты анализа от всех собственных частот. Это делает функцию коэффициентов передачи в рассматриваемой полосе более устойчивой к рассогласованию, поскольку в таких полосах функция коэффициентов передачи определяется суммой нескольких мод.

Суммирование целевых функций в случае широкополосного источника может улучшать результат локализации. Для положения I источников на рисунке 2.4 приведены графики зависимости вероятности правильного разрешения P_t источников в зависимости от числа частотных полос n_{fr} , использующихся для суммирования целевых функций метода MUSIC и метода наименьших квадратов. Для каждого значения числа полос n_{fr} для расчета значения P_t использовалось 50 наборов по n_{fr} случайно выбранных полос из общего набора в 700 полос. Стоит отметить, что значения целевых функций метода MUSIC для каждой частотной

полосы перед суммированием были нормированы на максимальное значение в соответствующей полосе. Результат на рисунке приведен для верифицированной модели.

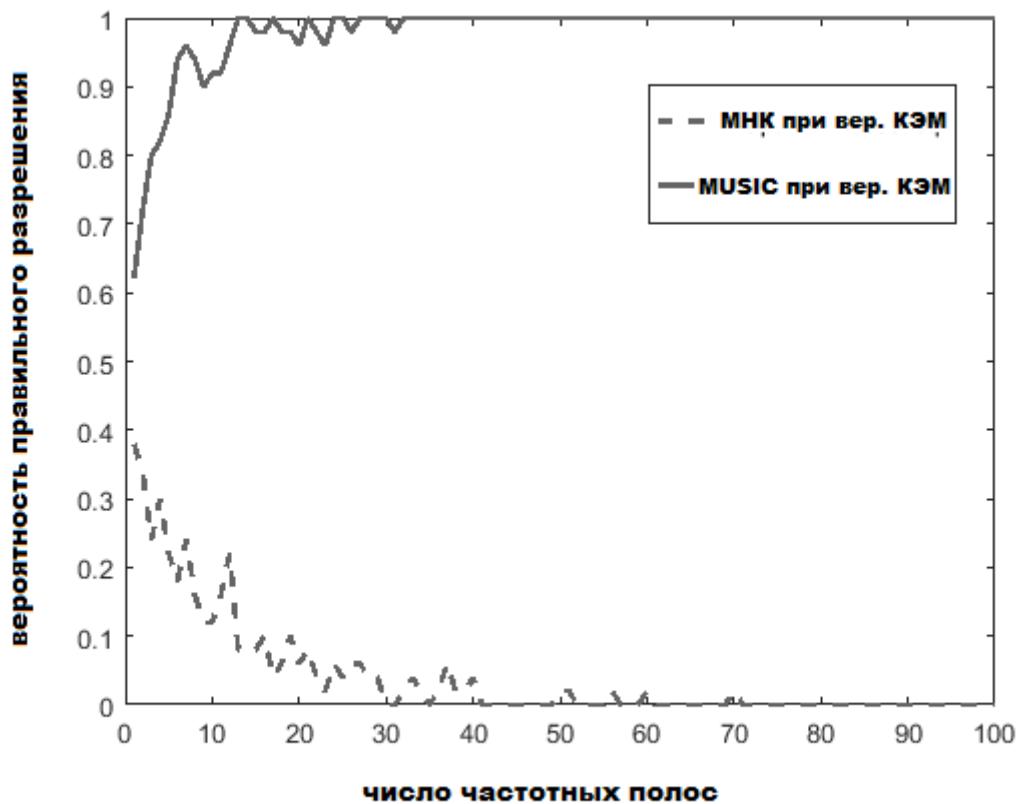


Рис. 2.4. График вероятности правильного разрешения в зависимости от числа частотных полос, эксперимент с первой конструкцией

Видно, что суммирование целевых функций метода MUSIC позволяет увеличить вероятность правильного разрешения виброисточников. Для достижения безошибочного результата локализации в случае верифицированной КЭМ достаточно 10 полос. Суммирование целевых функций МНК не позволило улучшить результат локализации.

В эксперименте со второй конструкцией (упоминаемой в гл.1) возбуждение производилось широкополосным белым гауссовским шумом в диапазоне частот 50–2400 Гц; виброисточники были разнесены на расстояние порядка 40 см (при

характерном масштабе конструкции 1 м). В эксперименте сравнивались эффективности разрешения источников по модифицированному методу MUSIC (2.3), методу максимума правдоподобия (1.8), а также МНК (1.11). Расчет целевых функций методов производился с использованием КЭМ механоакустической конструкции в 60 частотных полосах с шириной 0,9 Гц. Полосы выбирались из диапазона от 100 до 600 Гц. МНК и метод максимума правдоподобия применялись в предположении единственного источника. Вероятность правильного разрешения виброисточников оценивалась аналогично эксперименту с первой конструкцией. Для каждой детали составной конструкции определялась соответствующая область узлов (к примеру, область представляет собой цилиндр, в центре основания которого – источник, радиус равен 5 см, высота равна 10 см). Если глобальный максимум суммарной целевой функции полосы расположен в области узлов одной детали составной конструкции, а при исключении данной области глобальный максимум будет располагаться в области узлов другой детали, где установлен источник, – считалось, что источники разрешены правильно.

В эксперименте с 61 вибродатчиком метод MUSIC правильно разрешил источники в 45 из 60 полос, МНК – в 4 из 60 полос, метод максимума правдоподобия – в 10 из 60 полос. При численном моделировании метод MUSIC правильно разрешил источники во всех 60 полосах, МНК в 31 из 60 полос, метод максимума правдоподобия в 33 из 60 полос. Характерные случаи разрешения двух виброисточников в эксперименте приведены на рисунках 2.5 и 2.6.

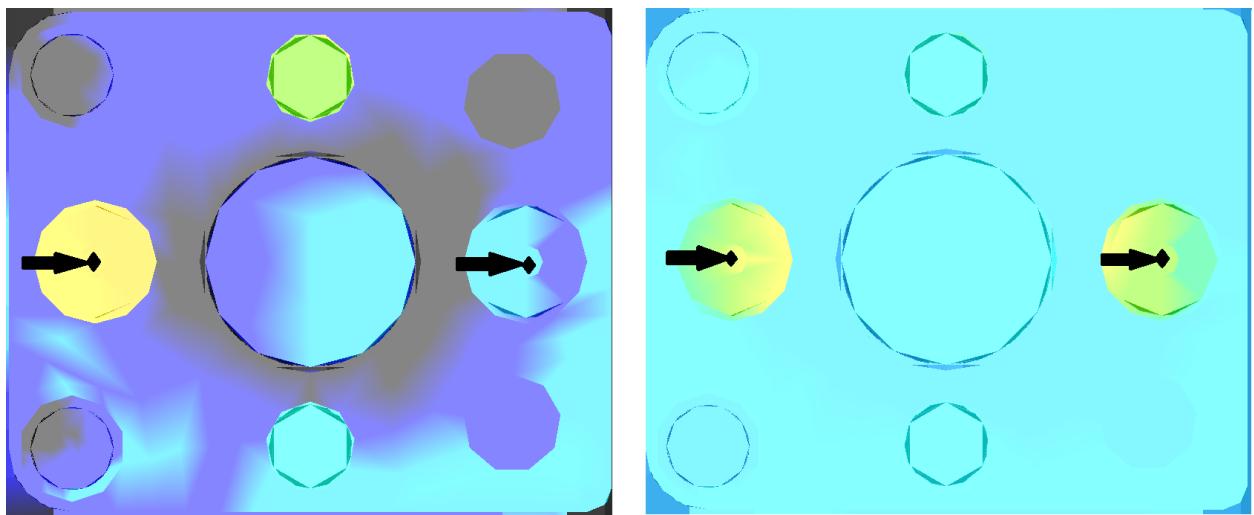


Рис. 2.5. Сравнение методов локализации источников (МП – слева, MUSIC – справа) в эксперименте. Частота – 348 Гц, 61 контрольная точка. Черными стрелками показано положение виброисточников. Вторая конструкция

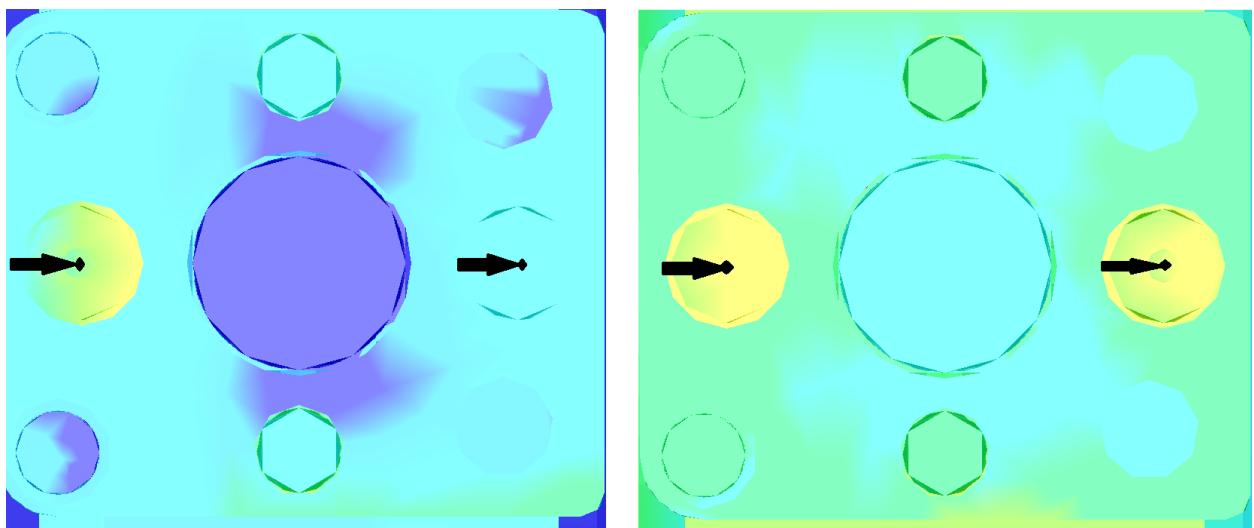


Рис. 2.6. Сравнение методов локализации источников (МП – слева, MUSIC – справа) в эксперименте. Частота – 547 Гц, 61 контрольная точка. Черными стрелками показано положение виброисточников. Вторая конструкция

Для того же расположения источников на рисунке 2.7 приведены графики зависимости вероятности правильного разрешения источников P_t в зависимости от числа частотных полос n_{fr} , по которым суммировались целевые функции метода MUSIC, максимума правдоподобия и наименьших квадратов. Для каждого

значения числа полос n_{fr} для расчета значения P_t бралось 500 наборов по n_{fr} случайно выбранных полос в диапазоне от 100 до 600 Гц. Так же, как и в эксперименте с первой конструкцией, значения целевых функций метода MUSIC для каждой частотной полосы перед суммированием были нормированы на максимальные значения в соответствующих полосах.

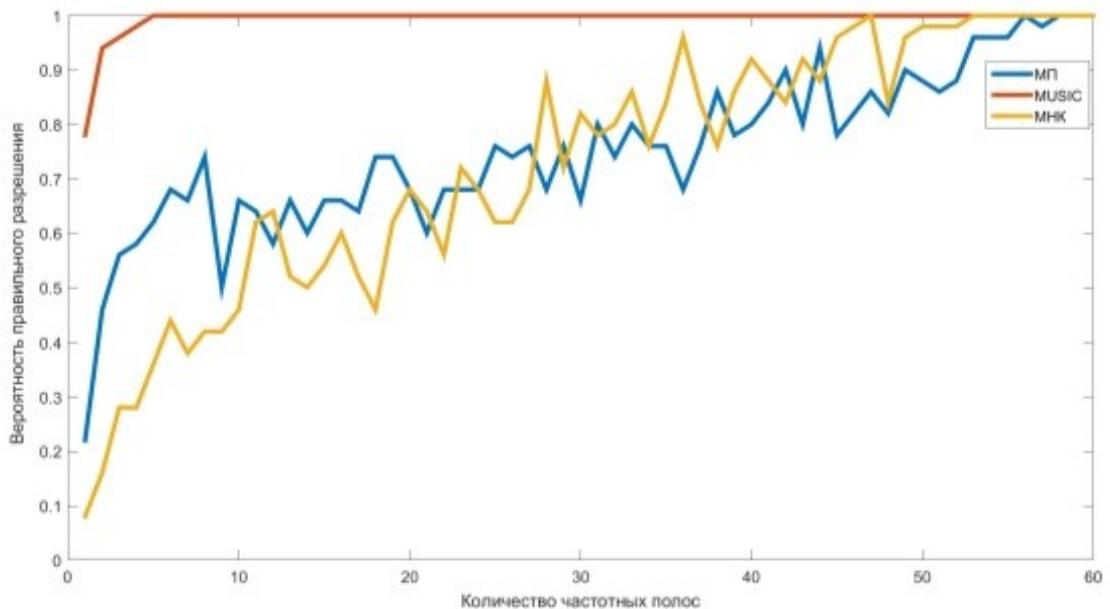


Рис. 2.7. Вероятность правильного разрешения виброисточников в зависимости от числа частотных полос, эксперимент со второй конструкцией

Видно, что модифицированный метод MUSIC позволяет эффективнее разрешать виброисточники по сравнению с другими методами.

Также в работе была произведена оценка вероятности правильного разрешения в зависимости от числа частот для разных случайных комбинаций из 35 датчиков. Эти вероятности для различных методов приведены на рисунке 2.8.

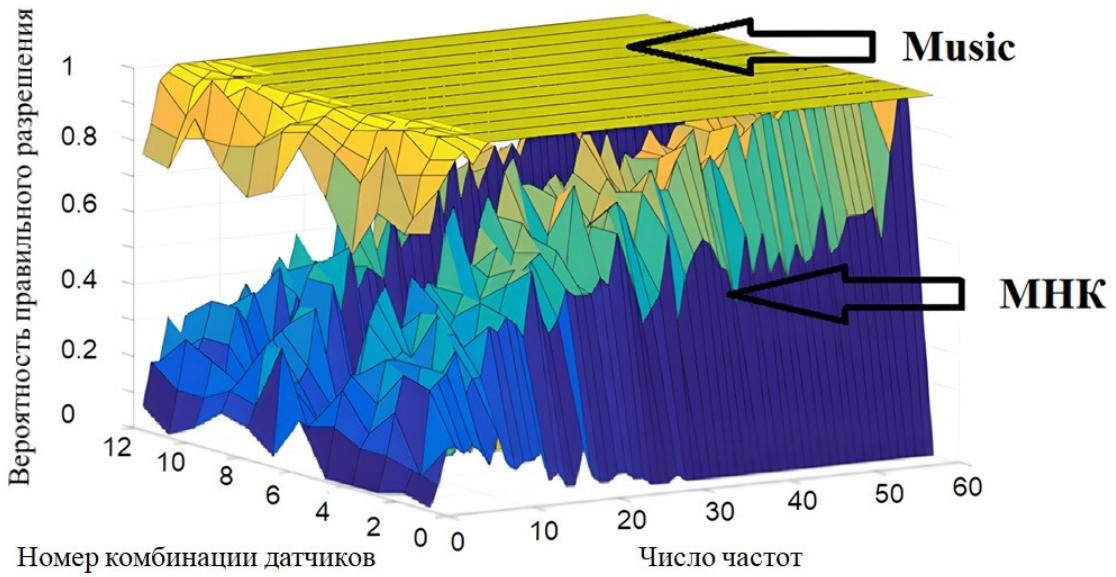


Рис. 2.8. Вероятность правильного разрешения виброисточников в зависимости от числа частотных полос для разных комбинаций вибродатчиков, эксперимент со второй конструкцией

Таким образом, экспериментальная апробация с несколькими конструкциями и численное моделирование показали, что модифицированный метод MUSIC в отличие от МНК и метода максимума правдоподобия позволяет эффективно локализовать несколько одновременно работающих виброисточников. ,

2.3 Реализация процедуры локализации нескольких виброисточников в ПО «САТЕС»

Предложенный в данной главе метод локализации нескольких виброисточников с использованием модифицированного метода MUSIC (2.3) реализован в ПО «САТЕС» в модуле «Поиск источника». Так же, как и в случае с одним виброисточником, можно выбрать и параметры обработки экспериментального файла (фрагмент, ширина полосы, диапазон и т.д.), и параметры локализации. На рисунке 2.9 представлен результат локализации двух

виброисточников, расположенных на модельной пластине. Локализация по методу MUSIC позволила в данном случае правильно разрешить источники.

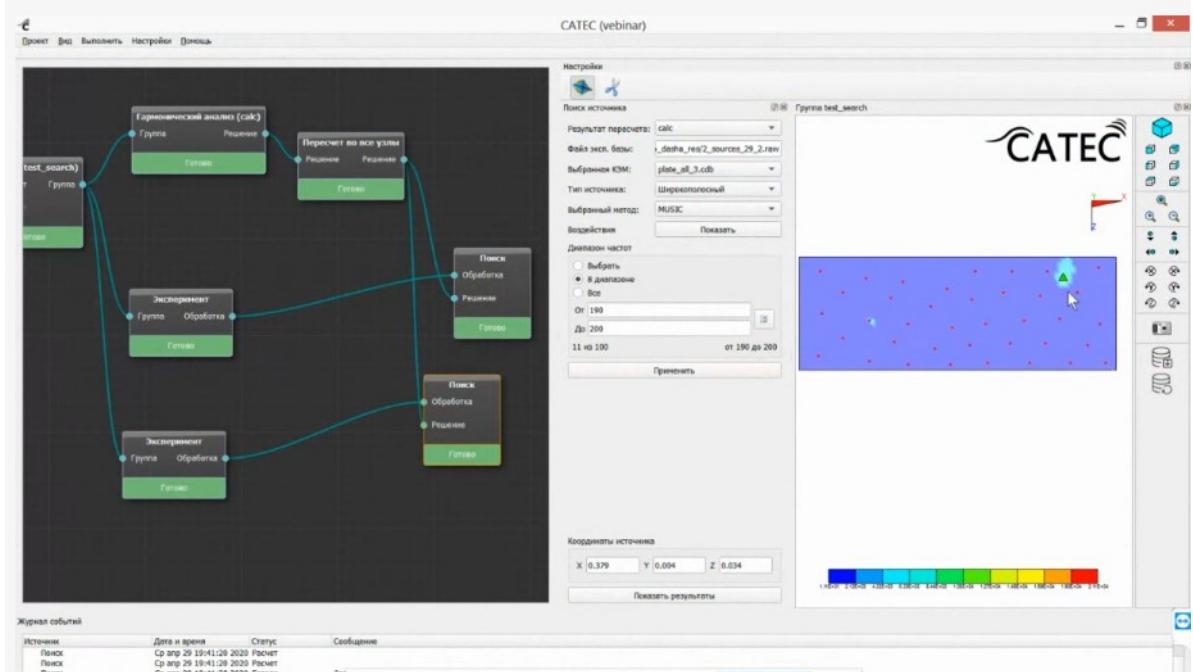


Рис. 2.9. Метод MUSIC в локализации источника, модуль «Поиск источника».

Интеграция модифицированного метода MUSIC для локализации нескольких источников в ПО «САТЕС» существенно расширила возможности данного программного обеспечения в области акустической диагностики.

2.4 Заключение по второй главе

В данной главе рассмотрена задача локализации двух виброисточников в механоакустической системе. Для её решения на основе метода MUSIC разработан алгоритм, позволяющий с высокой вероятностью разрешить источники и определить их положение. Предложенный алгоритм обладает приемлемой для практического применения вычислительной сложностью, его высокая эффективность показана на экспериментальных и синтетических данных. В сравнении с МНК и МП модифицированный метод MUSIC демонстрирует значительное превосходство по вероятности разрешения и точности локализации источников. Отметим, что полноценное применение МНК и МП для модели двух и более источников затруднительно из-за слишком высокой вычислительной

сложности. Дополнительно в данной главе показана эффективность предложенного способа определения числа источников, основанного на анализе спектра собственных чисел корреляционной матрицы регистрируемого сигнала. Приведены рекомендации по выбору ширины полосы фильтрации сигнала.

ГЛАВА 3. Проекционный алгоритм обнаружения вибродатчиков со значительным рассогласованием модели и другими аномалиями

В третьей главе диссертации рассматривается задача определения аномальных показаний на вибродатчиках. В виброакустических задачах распространенной проблемой при проведении измерений с использованием набора вибродатчиков является отсутствие точной модели сигнала на приемниках. Подобная неопределенность может привести к резкому ухудшению результатов обработки данных. Также из-за неисправности вибродатчики могут выдавать некорректный результат, ухудшающий качество измерений. Поиск таких аномальных датчиков представляет отдельную нетривиальную задачу. В диссертации для решения данной задачи предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным алгоритмам. Основные результаты, представленные в главе, опубликованы в работах [62,67,68].

3.1 Аномалии показаний на вибродатчиках и решение обратной задачи

Рассмотрим задачу локализации виброисточников с применением методов, описанные в предыдущих главах (МНК – (1.11), MUSIC – (2.3)). Отклик конструкции на воздействие в одной из узких частотных полос, прежде всего, определяется модами (собственными формами конструкции) и соотношением их вклада в результирующее колебание. На разных частотах и при разных положениях источника и вибродатчиков функция коэффициентов передачи определяется разными наборами мод. Собственные формы и собственные частоты колебаний КЭМ и реальной конструкции различаются даже после уточнения модели. При высоком ОСШ качество локализации определяется именно разницей между модельной и реальной функциями коэффициентов передачи. При этом в одной полосе амплитуда и фаза колебаний может лучше совпадать с модельными значениями на одних вибродатчиках, а чем на других вибродатчиках и частотах.

Можно представить конструкцию с заметным дефектом, за счет чего в одних точках конструкции собственные формы колебаний могут гораздо больше отличаться от модельных форм, чем в других точках. Отметим, что наборы таких «аномальных»/«плохих» вибродатчиков с наибольшим рассогласованием реальной конструкции и модели будут отличаться для разных частот. Это происходит потому, что наборы мод, вносящих существенный вклад в результирующее колебание, различаются (при этом рассогласование модельных и реальных пространственных форм и частот для каждой моды уникально). Наличие таких аномальных датчиков может существенно ухудшать результат локализации источников, приводя даже к принципиальной невозможности корректной локализации. Отметим, что аномальным («плохим») в данном случае датчик делает именно рассогласование КЭМ и конструкции, а, например, не аппаратные неисправности. Для корректного решения обратной задачи локализации необходим способ, который способен исключить такие аномальные датчики за счет сопоставления данных модели и эксперимента. Также предпочтительно, чтобы способ селекции датчиков позволял исключать и датчики с аппаратными неисправностями, резкими выбросами сигнала и т.д.

3.2 Проекционный алгоритм определения аномальных измерений в задаче локализации виброисточников

На частоте f_0 для каждого i -го узла КЭМ рассчитаем матрицу коэффициентов передачи и для каждого узла составим $K \times 3$ матрицу

$$\mathbf{B}_i = [\overline{\mathbf{A}_x} \ \overline{\mathbf{A}_y} \ \overline{\mathbf{A}_z}] . \quad (3.1)$$

Здесь $\overline{\mathbf{A}_x} = \frac{\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_x}{\|\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_x\|_2}$, $\overline{\mathbf{A}_y} = \frac{\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_y}{\|\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_y\|_2}$, $\overline{\mathbf{A}_z} = \frac{\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_z}{\|\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_z\|_2}$

соответственно, а $\mathbf{F}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Из матриц \mathbf{B}_i составим матрицу $K \times 3N$

$\mathbf{M} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_i, \dots, \mathbf{B}_N]$, где N – число узлов в модели. Матрицы \mathbf{B}_i состоят из нормированных модельных откликов на единичные воздействия в трех направления для каждого узла, а матрица \mathbf{M} состоит из откликов для всей модели. Матрица $\mathbf{T} = \mathbf{M}\mathbf{M}^H$ содержит $D \leq K$ главных компонент (собственных векторов $\mathbf{W}_1 \dots \mathbf{W}_D$). Здесь следует дать пояснение. Рассмотрим ситуацию на примере прямоугольной пластины, когда неравенство является строгим. Отклик на определенной частоте складывается из суммы пространственных гармоник. Для корректной оценки параметров и устранения неоднозначности, в соответствии с теоремой Котельникова (для пространства), расположение вибродатчиков должно иметь определенный минимальный пространственный шаг, данный шаг связан с длиной волны гармоники с наибольшей частотой. В данном случае будет выполняться неравенство $D \leq K$.

Любой отклик на воздействие может быть выражен как линейная комбинация указанных выше компонент. Можно предположить, что при наличии рассогласования между КЭМ и конструкцией экспериментальный отклик \mathbf{v}_j будет разложен по ортогональным компонентам $\mathbf{W}_1 \dots \mathbf{W}_D$ с существенной погрешностью. Вероятно, эта погрешность будет максимальной на аномальных или «плохих» датчиках. Удаление таких датчиков способно существенно повлиять на соответствие эксперимента и модели и, как следствие, на решение обратной задачи.

Попробуем определить такие датчики с использованием матрицы \mathbf{T} . Будем последовательно исключать каждый датчик, т.е. удалять соответствующие k -ую строку и столбец из матрицы \mathbf{T} , получая, таким образом, для каждого удаленного k -ого датчика матрицу \mathbf{T}_k . Для определения размерности ортогонального базиса D и последующего отбора собственных векторов будем использовать распространенный критерий CPV (Cumulative Percent Variance) [74]

$$\frac{\sum_{w=1}^D \lambda_w}{\sum_{w=1}^{K-1} \lambda_w} > 0,99, \quad (3.2)$$

где λ_w – собственные числа матрицы \mathbf{T}_k . Критерий (3.2) заключается в отборе D компонент (из общего числа в $K-1$) по суммарному «весу», определяемому через спектр собственных чисел. Пороговое значение определяется произвольно, в данном случае считается, что D компонент имеют суммарный вес в 99 процентов и любой отклик может быть с достаточной точностью представлен как линейная комбинация данных компонент. CPV выбран в данном случае исходя из простоты применения, возможно использование и других критериев (см. например [74]).

Проделаем ту же операцию исключения датчиков с экспериментальными данными и получим набор \mathbf{v}_{jk} – векторов отсчетов сигнала в момент времени j без k -ого датчика. Для каждого k найдем отношение:

$$F_{sensor}(k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{v}_{jk}}{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{C} \mathbf{C}^H \mathbf{v}_{jk}}. \quad (3.3)$$

где $\mathbf{C} \mathbf{C}^H = \sum_{d=D+1}^{K-1} \mathbf{c}_d \mathbf{c}_d^H$, \mathbf{c}_d – собственные векторы матрицы \mathbf{T}_k , соответствующие младшим $D+1 \leq w \leq K-1$ собственным числам λ_w . Функция (3.3) вычисляется для каждого k -ого датчика в каждой частотной полосе f_0 и является мерой того, насколько «хорошо» векторы экспериментальных отсчетов без k -ого датчика лежат в пространстве D модельных главных компонент. Знаменатель выражения (3.3), представляющий собой проекцию вектора экспериментальных отсчетов сигнала на $(K-1)-D$ собственных векторов матрицы \mathbf{T}_k , резко уменьшится при удалении аномального датчика. Причина этого в том, что проекция векторов \mathbf{v}_{jk} (лежащих в пространстве, образованном собственными векторами $\mathbf{W}_{k1} \dots \mathbf{W}_{kD}$, соответствующими D старшим собственным числам матрицы \mathbf{T}_k) на младшие собственные вектора \mathbf{c}_d при устранении рассогласования устремляется к нулю.

Можно предположить, что при удалении «нормальных» датчиков (без

рассогласования) отношение (3.3) для разных k будет меняться не так сильно, как при удалении аномальных датчиков. Функция (3.3) напоминает выражение проекционного метода MUSIC (2.1). Такой вид функции выбран произвольно, возможно применение и других видов функций (при этом, эффективность может отличаться)⁵. Резко выделяющиеся выбросы функции $F_{sensor}(k, f_o)$ можно определить, например, с помощью абсолютного медианного отклонения (MAD, median absolute deviation) [75]:

$$MAD = med(|F_{sensor}(1..K) - med[F_{sensor}(1..K)]|)b, b = 1.4826. \quad (3.4)$$

Те датчики, для которых выполняется неравенство

$$F_{sensor}(k) > med[F_{sensor}(1..K)] + 3MAD, \quad (3.5)$$

и будем считать аномальными датчиками. Отметим, что использование медианного отклонения является более робастным методом определения выбросов по сравнению с использованием среднеквадратичного отклонения. [76]

Такая методика позволяет для каждой узкой частотной полосы f_o определить аномальные и плохо согласующиеся (в силу рассогласования, и в силу аппаратных погрешностей) с моделью датчики.

3.3 Условия численного моделирования и экспериментальной апробации

Для исследования эффективности алгоритма селекции датчиков были проведены численное моделирование и эксперимент с упомянутой в главе 2 механической конструкцией. На рисунке 1.4 представлены фото конструкции с установленными вибродатчиками ивиброисточниками и ее конечно-элементная модель.

Так же как и в эксперименте по локализации нескольких источников, в качестве вибродатчиков использовались пьезоэлектрические акселерометры, установленные в контрольных точках конструкции и подключенные к сборщику данных. Каждый из акселерометров был ориентирован по одной из осей x , y или z

⁵ Вопрос о конкретном виде функции остается открытым

по нормали к поверхности модели. Всего было установлено 24 акселерометра: 22 на модели и 2 для контроля мощности на виброисточниках. Эксперимент проводился при двух взаимных положениях пары виброисточников (положение I и положение II), излучавших одновременно широкополосный белый гауссовский шум в диапазоне 100–800 Гц. В положении I мощность виброисточников во всем диапазоне излучаемого сигнала была примерно одинаковой, в положении II мощность во всем диапазоне одного из источников была приблизительно на 10 дБ выше. Сигнал на виброисточники подавался на протяжении приблизительно 2,5 мин.

Численный расчет модельной матрицы \mathbf{A} производился в диапазоне 100–800 Гц с шагом в 1 Гц. Апробация алгоритма селекции проводилась на неверифицированной КЭМ. Локализация единственного виброисточника проводилась по методу МНК (1.11), двух виброисточников по – модифицированному методу MUSIC (2.3).

3.4 Численное моделирование

Предварительно проведено имитационное моделирование локализации единственного модельного виброисточника, помещаемым в один из узлов. В моделировании использовались $K = 22$ модельных датчика, расположенных аналогично эксперименту. При проведении имитационного моделирования искусственное рассогласование вносилось следующими тремя разными способами (три сценария).

- 1) В каждой из полос в диапазоне 100–800 Гц с шагом в 1 Гц выбирался случайный вибродатчик, и отклик на данном датчике умножался на случайную гауссовую действительную переменную ψ с нулевым средним и единичным среднеквадратическим отклонением (СКО).

2) Аналогично п.1., только с добавлением случайным образом 4 «плохих» датчиков в каждую полосу.

3) Искусственно изменялся модуль Юнга для части конструкции (в диапазоне 100–800 Гц с шагом в 1 Гц).

Отношение сигнал/шум в ходе моделирования считалось бесконечным.

После расчета с помощью конечно-элементного моделирования матриц коэффициентов передачи \mathbf{A} для каждой частотной полосы и каждого возможного «плохого» датчика матрицы формировались матрицы \mathbf{T}_k . Размерность базиса D определялась по спектру собственных чисел, используя правило (3.2). В большинстве полос значения D были равны 4–7. В полосах, близких к собственным частотам конструкции, размерность D снижалась, в части полос D повышалась до 11. На рисунке 3.1 представлены спектры собственных чисел для двух частотных полос.

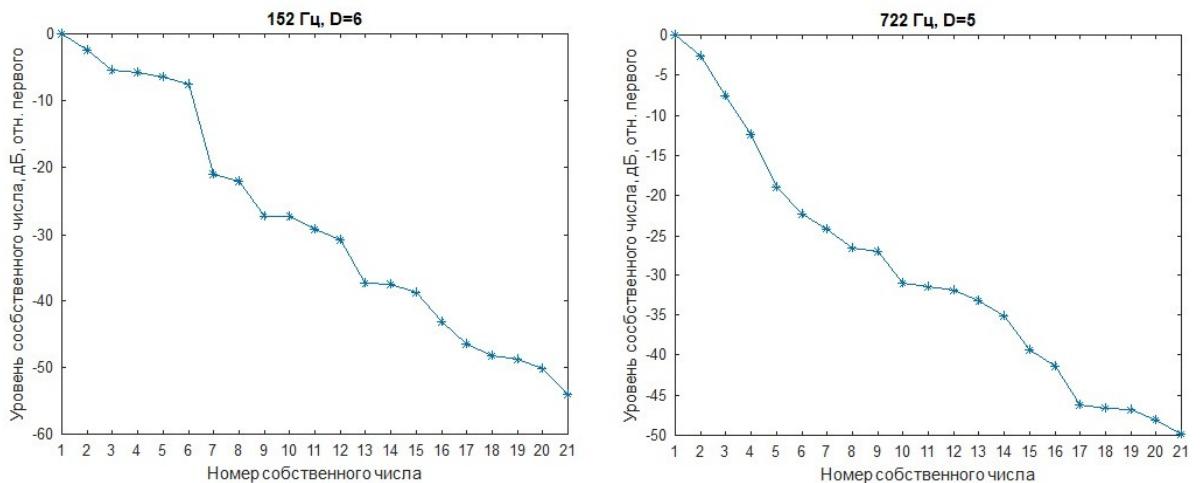


Рис. 3.1. Спектры собственных чисел двух матриц \mathbf{T}_k для двух частотных полос и определенного k . Слева размерность $D = 6$, справа размерность $D = 5$

Слева представлен спектр собственных чисел \mathbf{T}_k для частоты 152 Гц, справа для частоты 722 Гц, по правилу (3.2) определена размерность D (слева $D = 6$, справа $D = 5$).

На рисунке 3.2 представлено сравнение результатов локализации единственного виброисточника с использованием проекционного алгоритма отбора датчиков с результатами локализации без отбора. Сверху показаны результаты с ошибкой на одном датчике (А – без отбора, Б – с отбором), снизу – на 4 датчиках (В – без отбора, Г – с отбором). Показана ошибка локализации в метрах. Критерием неудачной локализации принята ошибка локализации больше 12 см (красная черта).

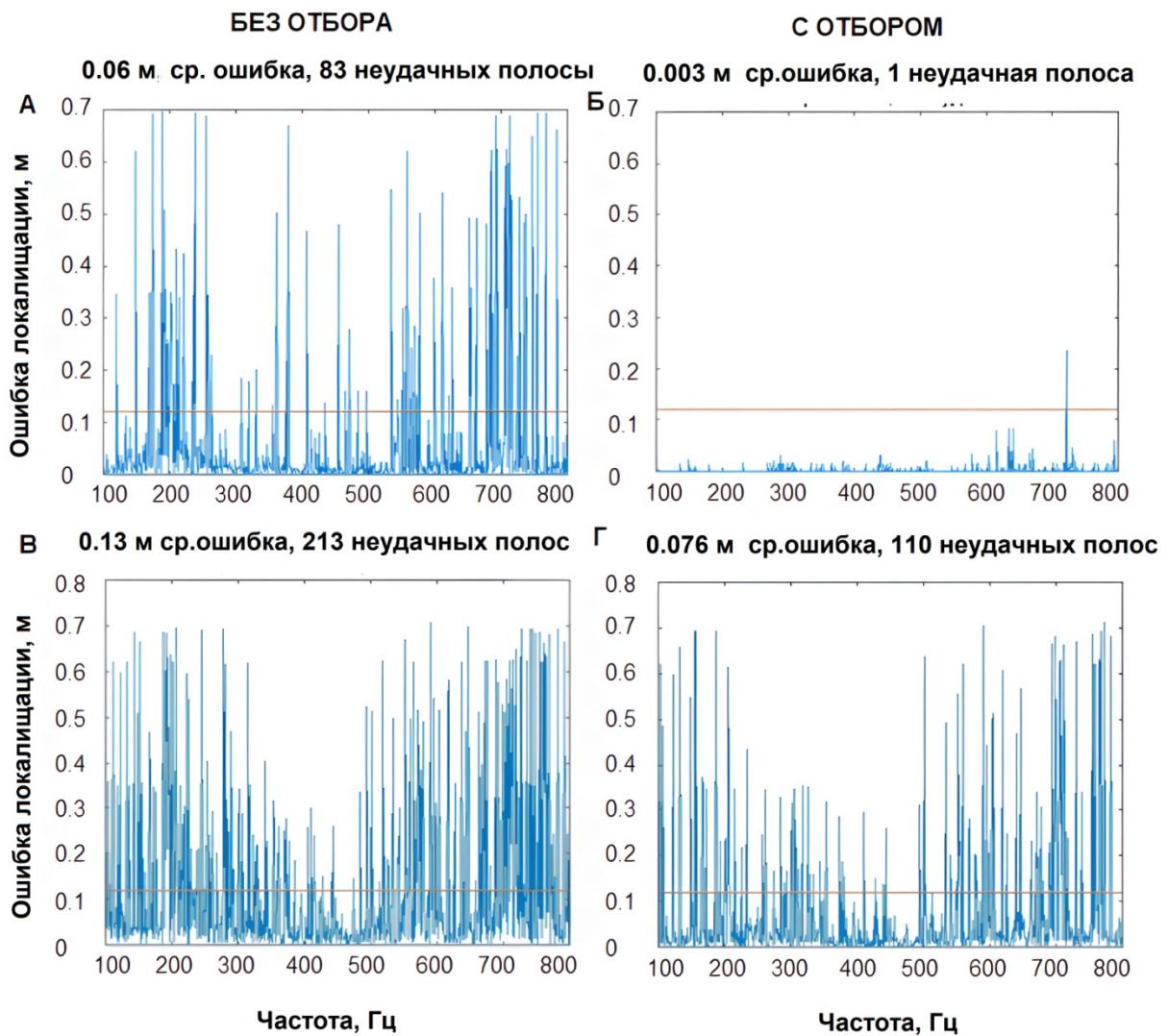


Рис. 3.2. Ошибка локализации единственного виброисточника с использованием алгоритма отбора датчиков (3.5) с введенной ошибкой на одном (А – без отбора, Б – с отбором) и на 4 датчиках (В – без отбора, Г – с отбором). Критерием неудачной локализации принятая ошибка локализации больше 12 см (красная черта)

Как видно из рисунка 3.2, отбор датчиков по алгоритму (3.5) позволил в случае одного аномального датчика (сценарий 1) практически полностью устранить ошибку локализации и уменьшить число неудачных полос с 83 до 1. В случае четырех аномальных датчиков (сценарий 2) предложенный алгоритм позволил существенно уменьшить число неудачных полос с 213 до 110. Отметим, что использование алгоритма (3.5) не обязательно исключает аномальные

датчики: в случае, если присутствие рассогласования поля на датчике не имеет существенного влияния на общее согласование модели и эксперимента, исключения этого датчика не происходит. Подобная ситуация хорошо отражается на графиках на рисунке 3.2,Б, где в ряде полос присутствует незначительная ошибка (следовательно определение аномального датчика не произошло). Если бы датчик был исключен, то ошибка локализации стала бы нулевой. При этом в большинстве случаев не происходит и избыточного исключения датчиков (т.е. исключения «хороших» датчиков), что позволяет использовать алгоритм «вслепую», то есть, не имея априорной информации о качестве модели и не заботясь о возможности ухудшения качества результата решения обратной задачи.

На рисунке 3.3,А приведен пример распределения амплитуды полезного сигнала на вибродатчиках до и после внесения чисто амплитудного искажения на двенадцатом вибродатчике на частоте 202 Гц. Это искажение привело к появлению аномальной ошибки локализации (ошибка локализации составляет несколько десятков сантиметров). На рисунке 3.3,Б приведены значения функции отбора (3.3) в зависимости от номера датчика k для данного сценария.

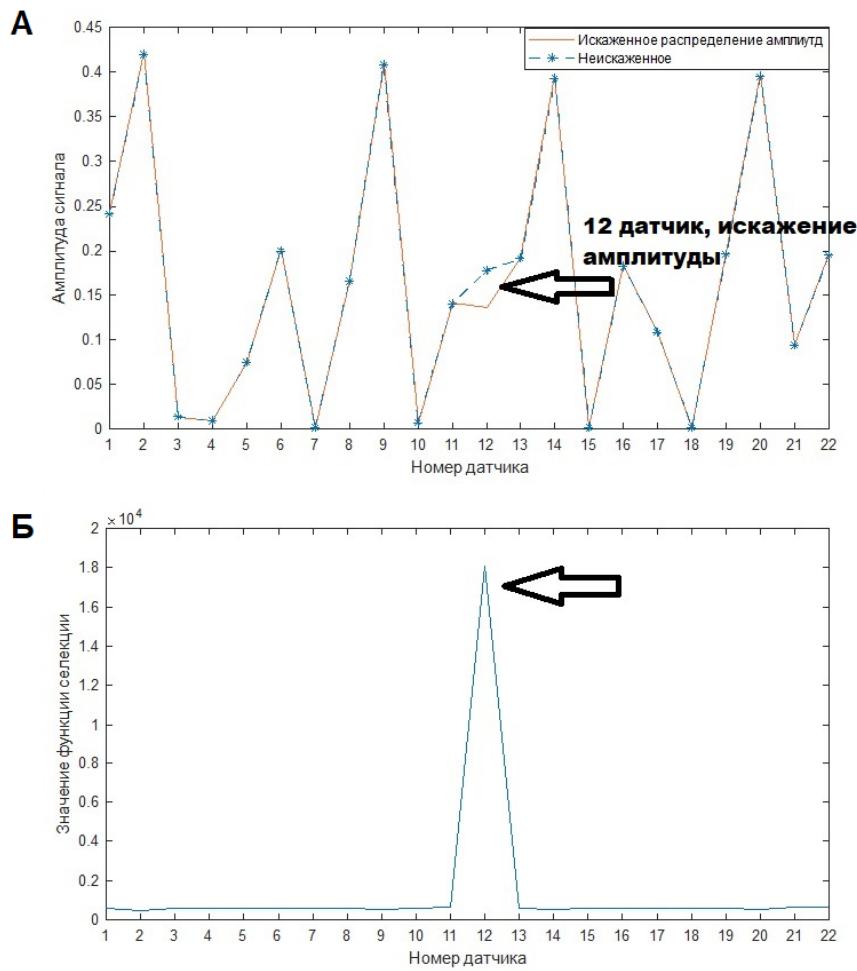


Рис. 3.3. А – Зависимость амплитуды сигнала от номера датчика с искажением (синяя кривая) и без (красная кривая). Б – функция отбора (3.3). Частота – 202 Гц.

Как видно из рисунка 3.3,Б, алгоритм отбора смог четко определить аномальный датчик. Его устранение привело к обнулению ошибки локализации.

Далее моделировался сценарий 2 – 4 «плохих» датчика. В качестве примере на рисунке 3.4 представлены значения функции (3.3) для двух разных частотных полос. Стрелками показаны аномальные датчики, определенные по алгоритму (3.5). Жирной линией представлена медиана функции (3.3), пунктиром – пороговое значение (3.5) $med[F_{sensor}(1..K)] + 3MAD$. Отметим, что функция (3.3) для «плохого» датчика может и не превысить критического значения. Это может, например, произойти в случае, когда показания датчика не оказывают решающего влияния на результат локализации в данной частотной полосе.

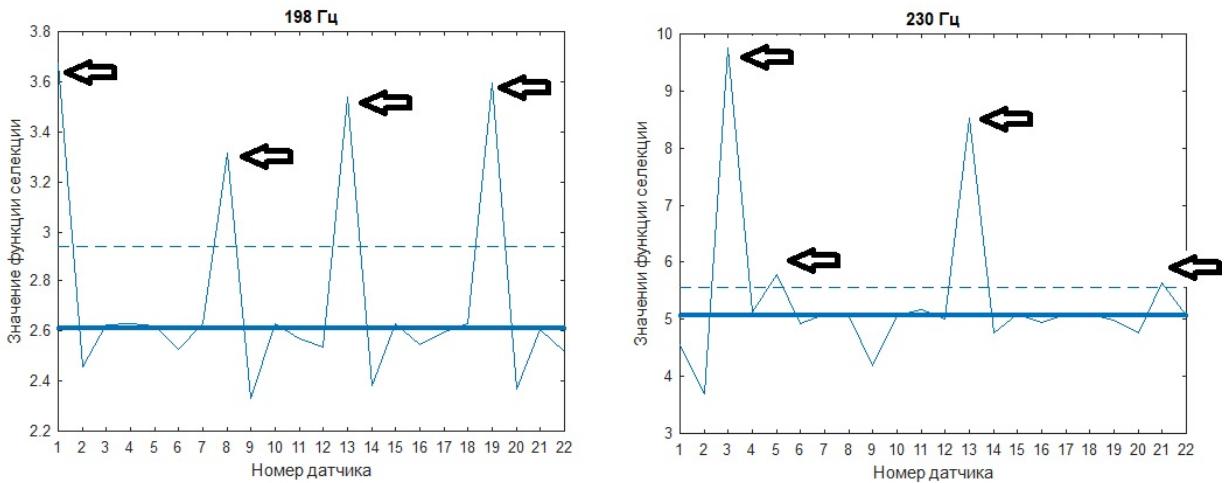


Рис. 3.4. Значение функции (3.3) для двух разных частотных полос, 4 аномальных датчика. Жирной линией показана медиана функции (3.3), пунктиром – значение (3.5). Все датчики с номером k , в которых $F_{sensor}(k)$ выше пунктира, считаются «плохими»

Проведено также моделирование, предполагающее локальное изменение модуля Юнга в части конструкции (сценарий 3). При этом «экспериментальный» отклик смоделирован с использованием КЭМ с изменением жесткости, а модельный – без. На рисунке 3.5,А представлена конструкция с цветовым распределением модуля Юнга. Для красной части модуль Юнга повышен с $2 \cdot 10^{11}$ Н/м² до $3,3 \cdot 10^{11}$ Н/м². Подобное изменение жесткости в части конструкции привело к появлению ошибок локализации, число «неудачных» полос стало равно 183 (до этого, из-за отсутствия рассогласования и высокого ОСШ, «неудачные» полосы отсутствовали). На рисунке 3.5,Б представлена зависимость ошибки локализации виброисточника от частоты в диапазоне 570–700 Гц (в этом диапазоне наибольшее число полос с ошибкой и наибольший эффект от метода отбора) без отбора аномальных датчиков (синяя линия) и с отбором (красная пунктирная линия).

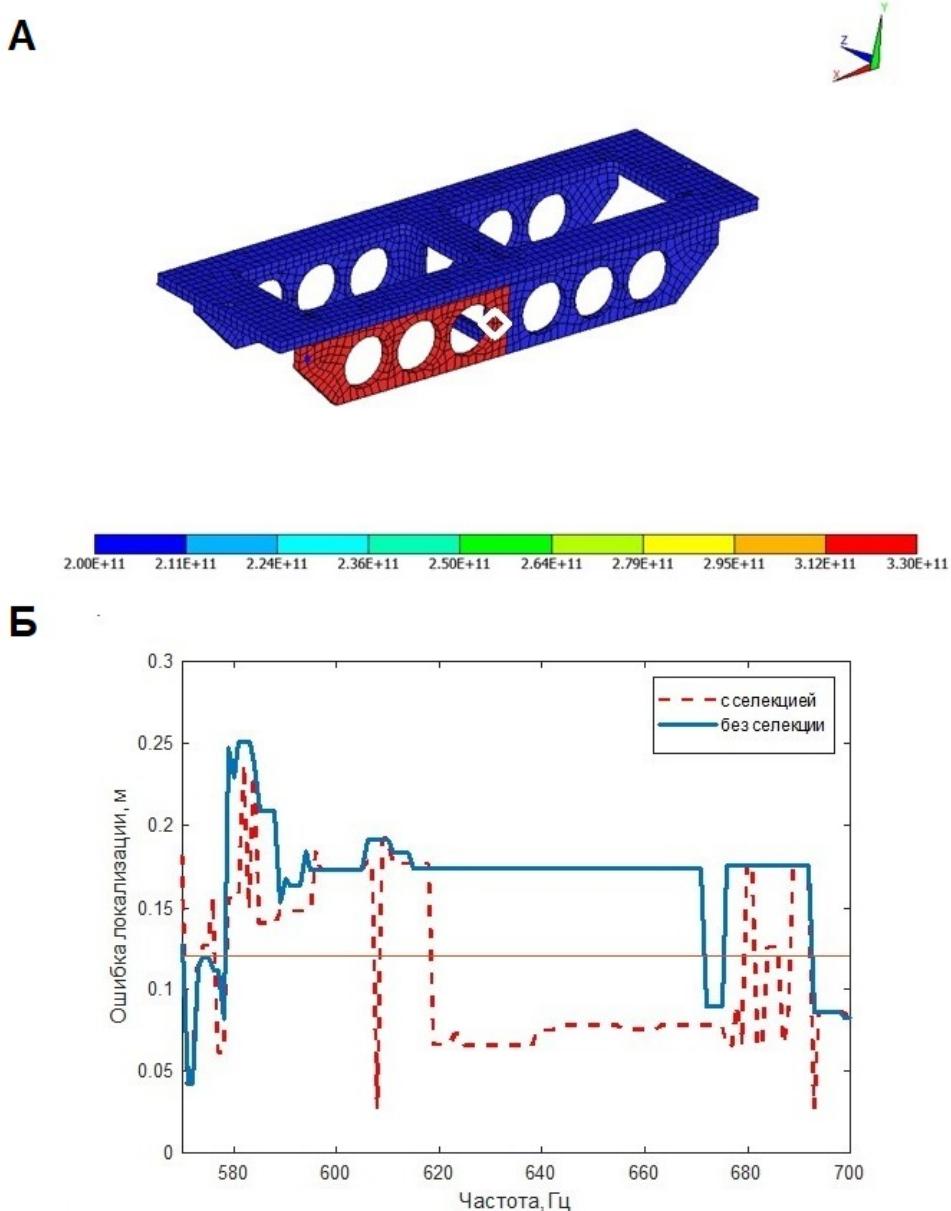


Рис. 3.5. А – Конструкция с цветовым распределением модуля Юнга; Б – Зависимость ошибки локализации виброисточника от частоты без отбора аномальных датчиков (синяя линия) и с отбором (красная линия). Показан результат для случая введения в конструкцию рассогласования модуля Юнга

Из рис. 3.5,Б видно, что отбор датчиков по алгоритму (3.5) привел к существенному улучшению качества локализации (в основном в диапазоне 570–700 Гц), при этом число неудачных полос снизилось со 183 до 132. Следует отметить, что при отборе исключались в основном датчики, расположенные на «измененной» части конструкции (со значительным рассогласованием).

3.5 Экспериментальная апробация

Апробация алгоритма (3.5) проводилась в эксперименте с двумя виброисточниками. Отметим, что в эксперименте с одним источником для данной конструкции даже неверифицированная КЭМ позволила получить хорошие результаты локализации, которые едва ли возможно существенно улучшить. В эксперименте с двумя виброисточниками записанный с вибродатчиков сигнал был подвергнут узкополосной фильтрации, центральные частоты полос были взяты в диапазоне 100–800 Гц с шагом 1 Гц. Таким образом, получилось 700 полос, ширина полосы фильтрации была выбрана 0,33 Гц. В рассматриваемом сценарии ставилась задача разрешения и правильной локализации двух источников с использованием модифицированного метода MUSIC (2.3). Считалось, что источники в данной полосе правильно разрешены, если глобальный максимум целевой функции расположен вблизи реального положения одного из источников – в области близлежащих узлов (сфере радиуса 12 см), а при исключении данной области глобальный максимум будет располагаться в области близколежащих узлов другого источника. Результаты разрешения с использованием алгоритма отбора (3.5) и без него представлены на рисунке 3.6 для различных двух взаимных положений источников. Зеленым отмечены полосы, в которых произошло улучшение результата после применения алгоритма отбора (3.5)

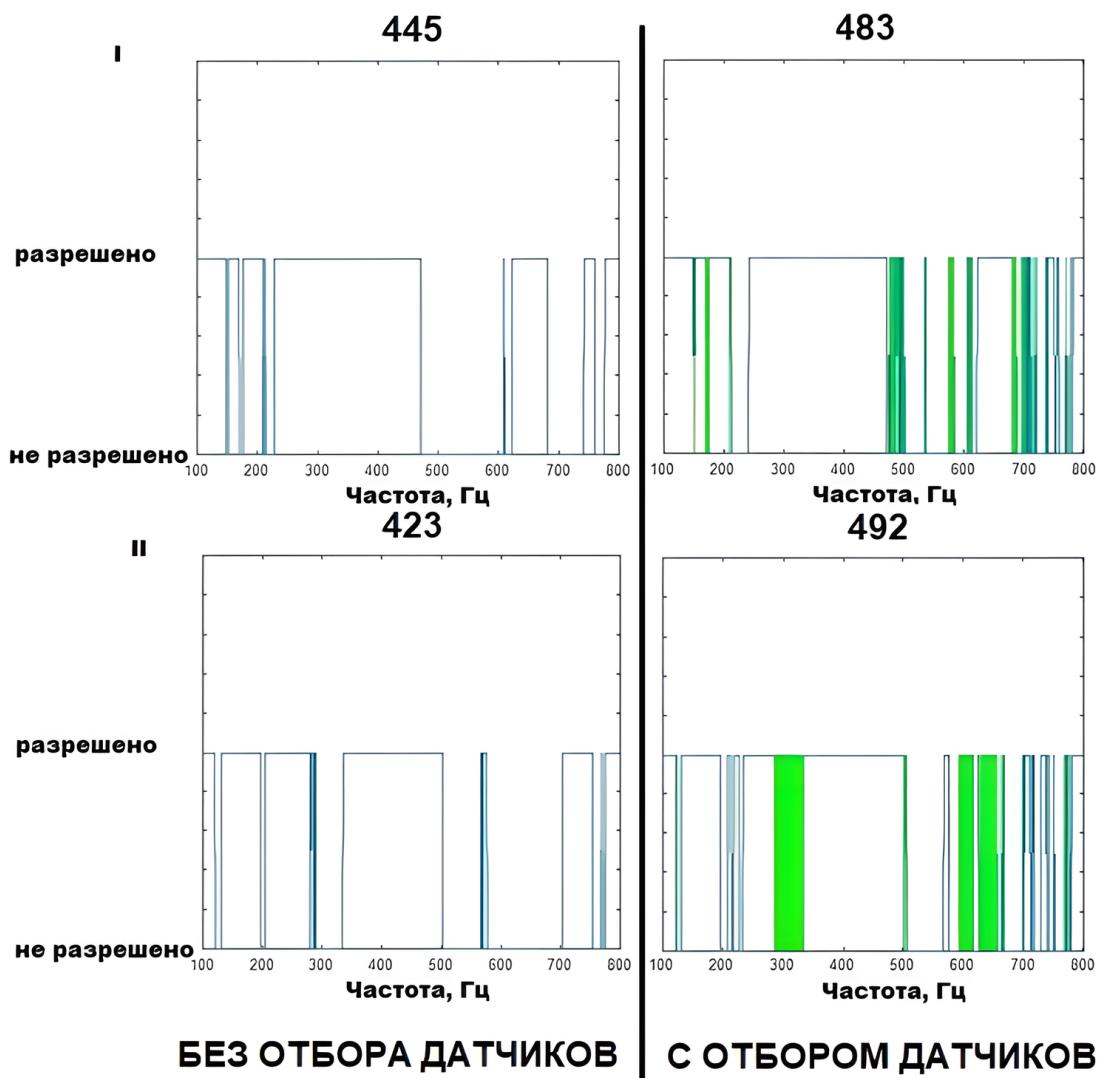


Рис. 3.6. Результат локализации двух виброисточников по методу MUSIC (2.3) с использованием алгоритма отбора (3.5) (справа) и без него (слева) для двух взаимных положений источников I и II. Зеленым отмечены полосы, в которых произошло улучшение результата. Для первого положения добавилось 38 полос разрешения, для второго – 69 полос.

На рисунке 3.7 для этих положений представлено характерное улучшение результата локализации в полосах 580 и 626 Гц, отмечены положения двух источников, определяемые модифицированным алгоритмом MUSIC. Отметим, что в результате отбора для разных полос удалялось разное число вибродатчиков

(от 0 до 6). Подобное разнообразие обусловлено различным рассогласованием модели и эксперимента на разных частотах.

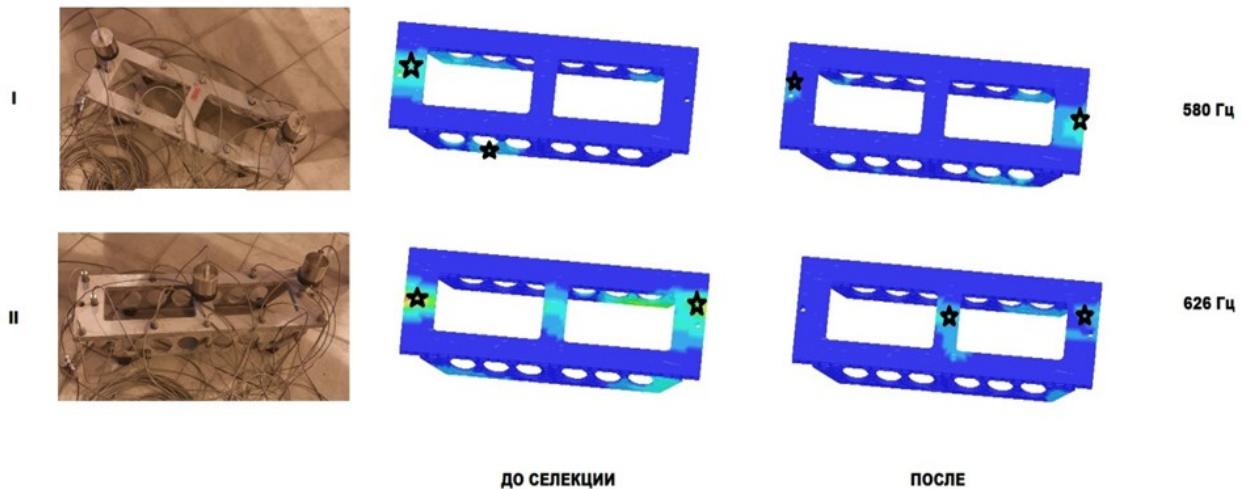


Рис. 3.7. Результат локализации двух виброисточников на частотах 580 Гц и 626 Гц по модифицированному методу MUSIC (2.3) с использованием алгоритма отбора (3.5) и без него. Результаты представлены для двух взаимных положений источников (I и II). Звездами отмечены локализованные источники

Из представленных результатов видно, что использование отбора предложенным в диссертации алгоритмом позволило существенно улучшить результат локализации и разрешения виброисточников.

3.6 Сравнение разработанного алгоритма с традиционными методами

Следует отметить, что большинство методов поиска аномалий на датчиках не предполагает совмещения модельных и экспериментальных данных (используются, как правило, только экспериментальные данные). В нашем случае эффективность предлагаемого проекционного алгоритма отбора датчиков может быть показана в сравнении с «жадной» [77,78] модификацией метода наименьших квадратов. Идея «жадных» алгоритмов состоит в принятии локально оптимальных решений на каждой итерации алгоритма, допуская, что конечное решение также окажется оптимальным. Предположим, что при решении

задачи локализации единственного виброисточника по МНК (1.11) определенное число R вибродатчиков (из общего числа в K) является аномальными. Полный перебор возможных плохих комбинаций C_K^R при максимизации функции (1.11) является вычислительно затратным (к примеру, $C_{22}^4 = 7315$). К тому же, как правило, на практике отсутствует априорная информация о числе R . В таком случае альтернативой полному перебору является использование «жадного» алгоритма, подразумевающего итерационное удаление по одному датчику с пересчетом функции (1.11) для всей модели на каждой итерации.

Подобный «жадный» алгоритм был применен при имитационном моделировании. Использовались $K=22$ датчика, в каждой из полос в диапазоне 100–200 Гц с шагом в 1 Гц выбирались $R = 4$ случайных датчика. Отклики на каждом из этих датчиков умножались на случайную гауссову действительную переменную ψ с нулевым средним и единичным СКО. Локализация единственного виброисточника производилась по методу наименьших квадратов (1.11) с исключением датчиков «жадным» способом. На каждой итерации «жадного» МНК проводился расчет целевой функции (коэффициента корреляции) по методу (1.11) для всех узлов модели с исключением каждого возможного k -ого «плохого» датчика. В каждой из полученной таким образом функции (1.11) $S_{MNK}(x, y, z, k)$ определялся узел с максимальным значением $S_{MAX}(k)$, потом уже в свою очередь определялось значение $S_{GREEDY} = \max_k [S_{MAX}(k)]$. Если на текущей итерации значение S_{GREEDY} оказывалось более чем на 0,01 больше этого же значения на предыдущей итерации, то k -ый датчик считался аномальным и исключался из рассмотрения. В противном случае процедура удаления датчиков останавливалась, и предполагаемым местом нахождения виброисточника считался узел, соответствующий S_{GREEDY} на предыдущей итерации. Процедура исключения датчиков «жадным» способом запускалась, если первоначальное значение целевой функции МНК $S_{MNK}(x, y, z)$ (коэффициента корреляции без удаления датчиков) удовлетворяло условию $S_{MNK}(x, y, z) < 0,95$. Сравнение

результатов применения подобного «жадного» алгоритма и проекционного алгоритма приведено в таблице 3.1. Неудачной считалась полоса, в которой ошибка локализации оказывалась больше 0,12 м.

Таблица 3.1. Сравнение эффективности проекционного и «жадного» методов, имитационное моделирование, диапазон 100–200 Гц, единственный виброисточник, аномалия на 4 датчиках

	Средняя ошибка, м	Число неудачных полос
Без удаления датчиков	0,2232	55
Проекционный алгоритм	0,1864	40
«Жадный» алгоритм	0,1943	42

Как видно, эффективность предлагаемого алгоритма оказалась близкой к эффективности «жадного» алгоритма. При этом вычислительная сложность «жадного» алгоритма примерно в RK раз выше, чем при использовании предложенного алгоритма. Процедура удаления аномальных датчиков проекционным алгоритмом выполняется предварительно перед проведением локализации для всех полос и не является вычислительно затратной, в то время как при использовании «жадного» алгоритма расчет выполняется для каждого возможного удаляемого датчика (в нашем случае $RK = 88$). Также стоит отметить, что «жадный» алгоритм не может применяться при локализации нескольких источников и использовании других, отличных от МНК функций (поскольку другие целевые функции не имеют однозначной интерпретации, в отличие, от коэффициента корреляции (1.11)).

3.7 Апробация проекционного алгоритма при проведении измерений с использованием микрофонных антенных решеток

В настоящее время микрофонные антенные решетки находят применения в широком классе прикладных задач. Одной из многочисленных областей их использования является построение акустических изображений – распределений в пространстве энергетических величин звукового поля. Такой подход может применяться и для диагностики механоакустических систем, для которых требуется выявить области повышенного шумоизлучения [79]. Для построения акустических изображений более эффективным является использование планарных (плоских) решеток. Нередко решетки для указанного выше класса задач состоят из большого числа приемных элементов (сотни или тысячи элементов). При этом возникает необходимость калибровки или автокалибровки микрофонов – определении неисправных микрофонов с некорректными показаниями [80]. Оставлять при обработке показания подобных микрофонов может быть опасно. Известно, что наличие даже единичных аномальных измерений в больших матрицах, составленных из массивов данных, может существенно ухудшить результат при проведении обработки [81]. В принципе несложно провести предварительную калибровку, однако микрофоны могут начать давать аномальные показания и в процессе эксплуатации решетки. Кроме того, сигналы внутренних шумов и другие помеховые сигналы могут возникать в определенной полосе и на ограниченное время. В таком случае предпочтительно иметь программные механизмы автокалибровки с целью автоматически определить с приемлемой вычислительной сложностью такие датчики (чтобы сохранить за системой свойство работы в реальном времени).

В рамках настоящего исследования разработанный проекционный метод (3.5) был применен к микрофонной 120 элементной эквидистантной плоской решетке с межэлементным расстоянием 5 см. Количество элементов вдоль перпендикулярных осей антенны составляло 10 и 12. Таким образом, размер решетки составлял 45 на 55 см. Предполагалось использование решетки, в том

числе и вне помещения, с использованием методов MUSIC и МПКС [82]. Модельными функциями Грина (вектора направлений) были плоские волны с соответствующими азимутами и углами места. В качестве системы сбора данных использовалась 128 канальная система сбора данных (8 каналов являются резервными).

С целью определить аномалии измерений на микрофонах был применен предлагаемый проекционный алгоритм (3.5). Акустический сигнал с решетки подвергался узкополосной фильтрации с шириной полосы в 10 Гц. Сначала алгоритм был применен в широкой полосе (500–1500 Гц). Для анализа был взят случайный фрагмент сигнала продолжительностью 0,5 с. Результаты для каждой узкой полосы, полученные по (3.3), были просуммированы по 100 узким полосам. Результат интегрирования по частоте представлен на рисунке 3.8.

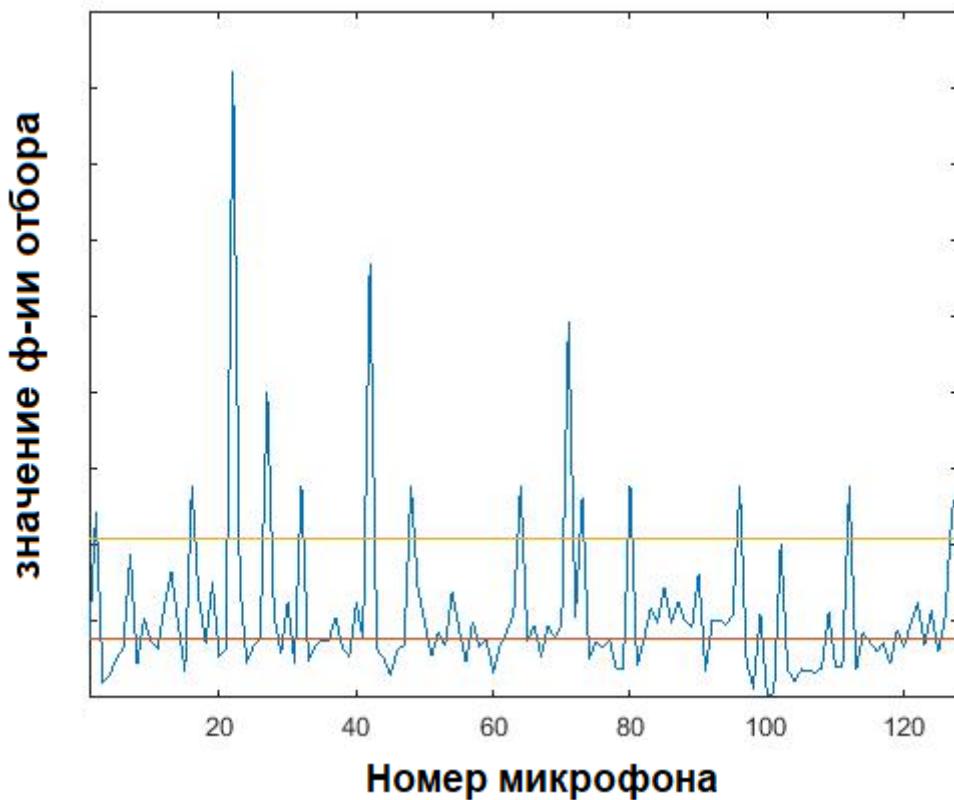


Рис. 3.8. Функция отбора (3.3), просуммированная в диапазоне 500–1500 Гц с шагом 10 Гц (100 полос), нижняя линия – медиана, верхняя – пороговое значение (3.5). Результат получен по фрагменту записи длиной 0.5 с. Каналы считаются аномальными, если соответствующая функция отбора превышает пороговое значение

На рисунке 3.8 отчетливо видно превышение значения функции отбора для ряда аномальных каналов (в число которых входят все 8 отключенных каналов, всего аномальными признаны 15 микрофонов). На рисунке 3.9 представлены спектрограммы и осциллограммы двух исправных микрофонов. На рисунке 3.10 представлены осциллограммы и спектрограммы аномальных микрофонов.

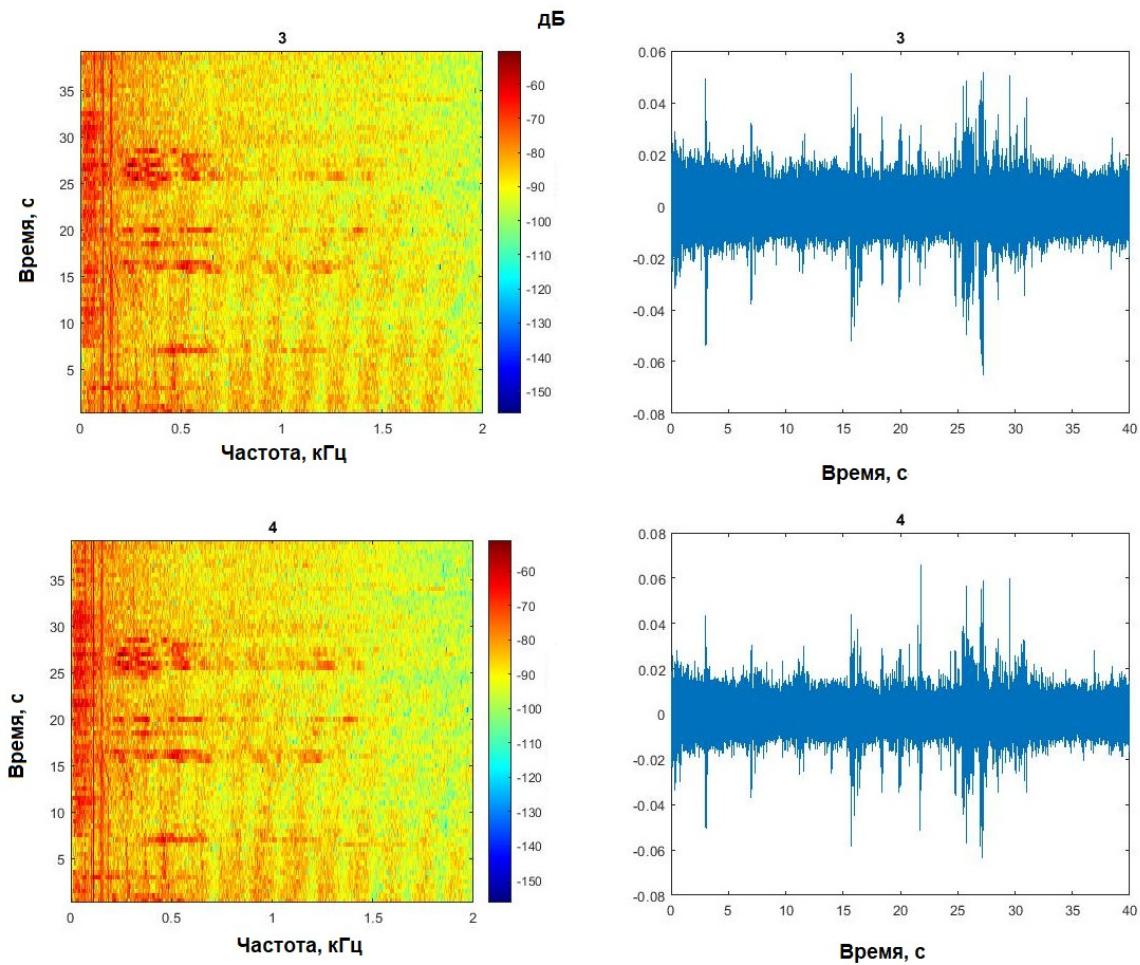


Рис. 3.9. Спектрограммы (слева) и осциллограммы (справа) исправных микрофонов. Номера микрофонов указаны сверху каждого графика

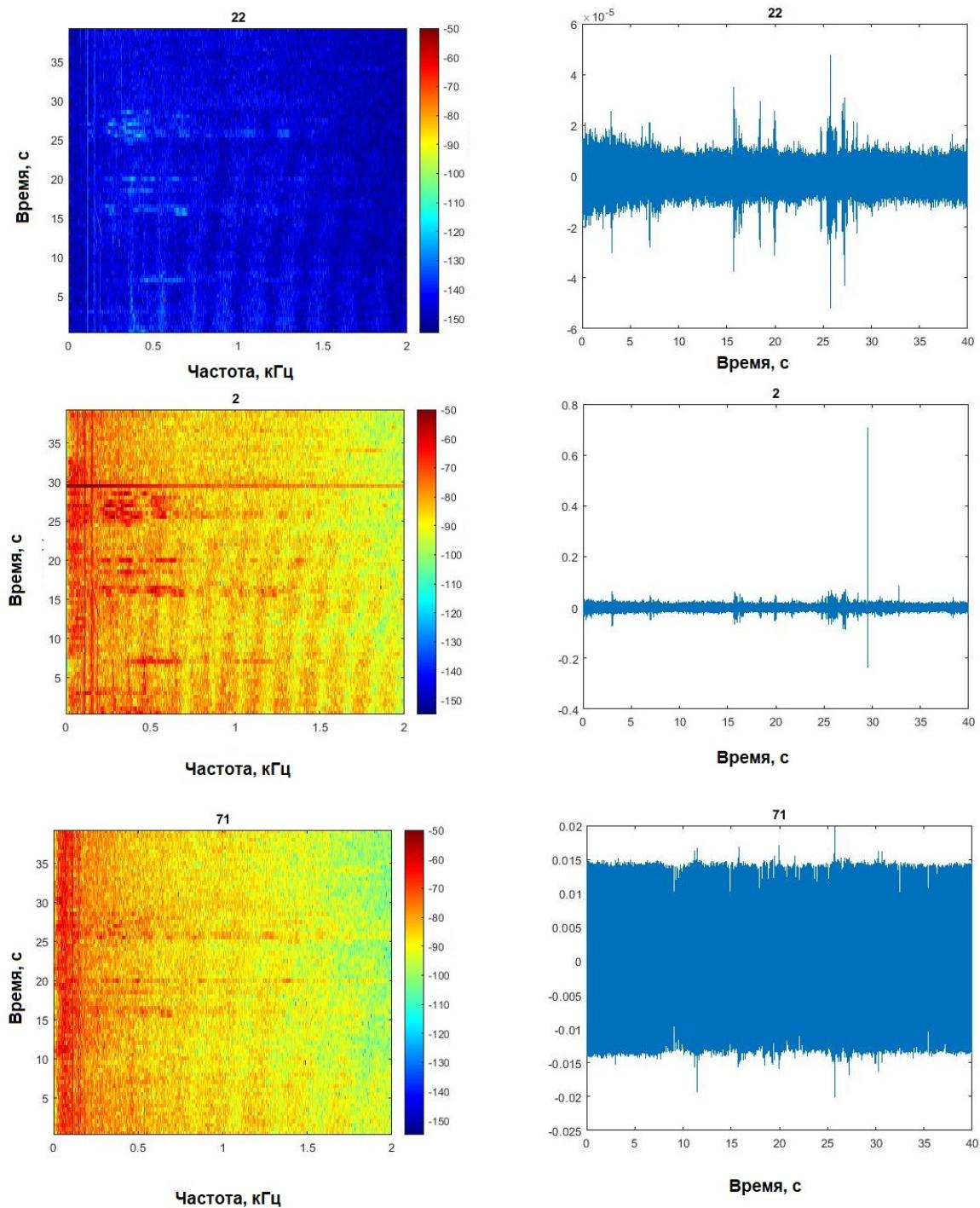


Рис. 3.10. Спектрограммы (слева) и осциллограммы (справа) аномальных микрофонов. Номера микрофонов указаны сверху каждого графика

Спектрограммы и осциллограммы для аномальных микрофонов (см. рисунок 3.10) отличаются от характерных для исправных микрофонов (см. рисунок 3.9). По спектрограмме и осциллограмме 22-го микрофона видно существенное снижение уровня сигнала во всем диапазоне частот, на 2ом

микрофоне присутствует импульсная помеха, на 71-ом микрофоне сигнал существенно отличается от сигнала исправных микрофонов. Указанные выше микрофоны определились как аномальные по проекционному алгоритму в широкой полосе частот. Отметим, что списки определяемых вручную и автоматически аномальных микрофонов хорошо согласуются. При этом микрофон может давать неправильные показания только в небольшой ограниченной полосе. На рисунке 3.11 представлен фрагмент спектрограммы микрофона с аномальным сигналом в полосе около центральной частоты 800 Гц.

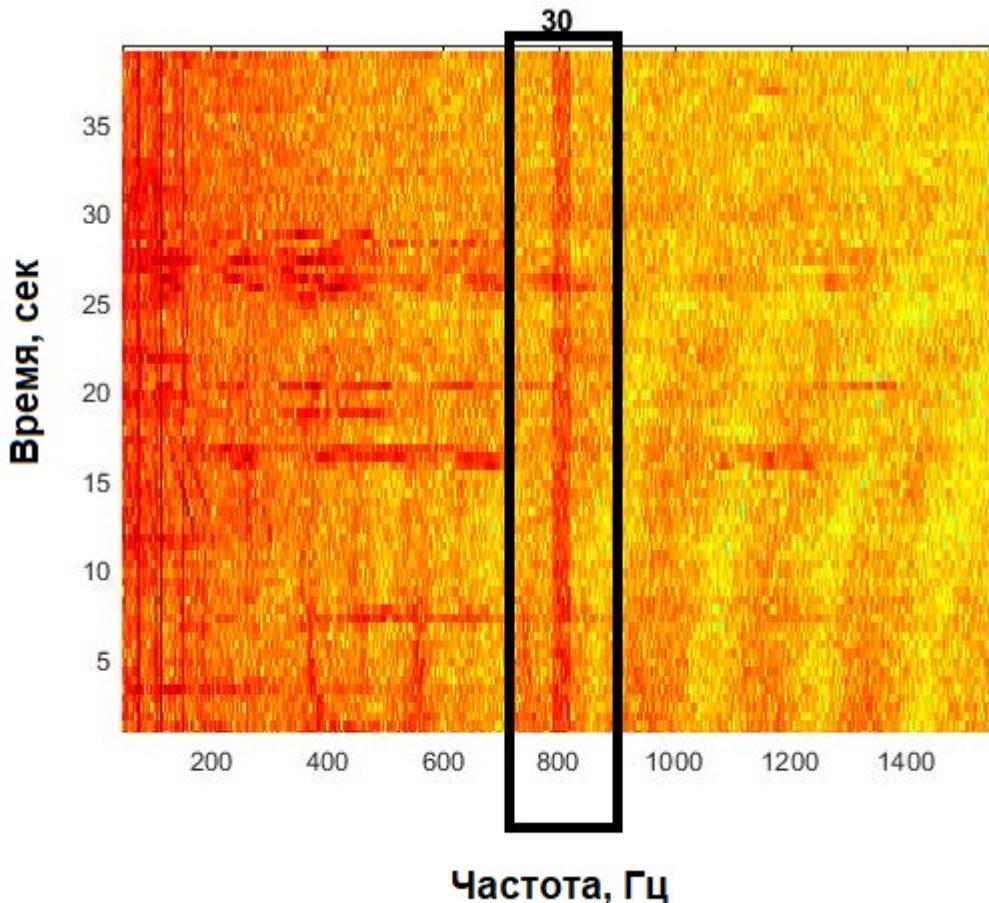


Рис. 3.11. Спектрограмма аномального в узкой полосе микрофона, обведено аномальное искажение в полосе

Два микрофона с аномальным искажением сигнала в полосе около частоты 800 Гц не определяются интегрально в широкой полосе, однако хорошо определяются по алгоритму (3.5) в узкой полосе после удаления микрофонов, определенных как аномальные в широкой полосе частот. Результаты расчета (3.5)

в одной узкой полосе до и после удаления двух микрофонов представлены на рисунке 3.12.

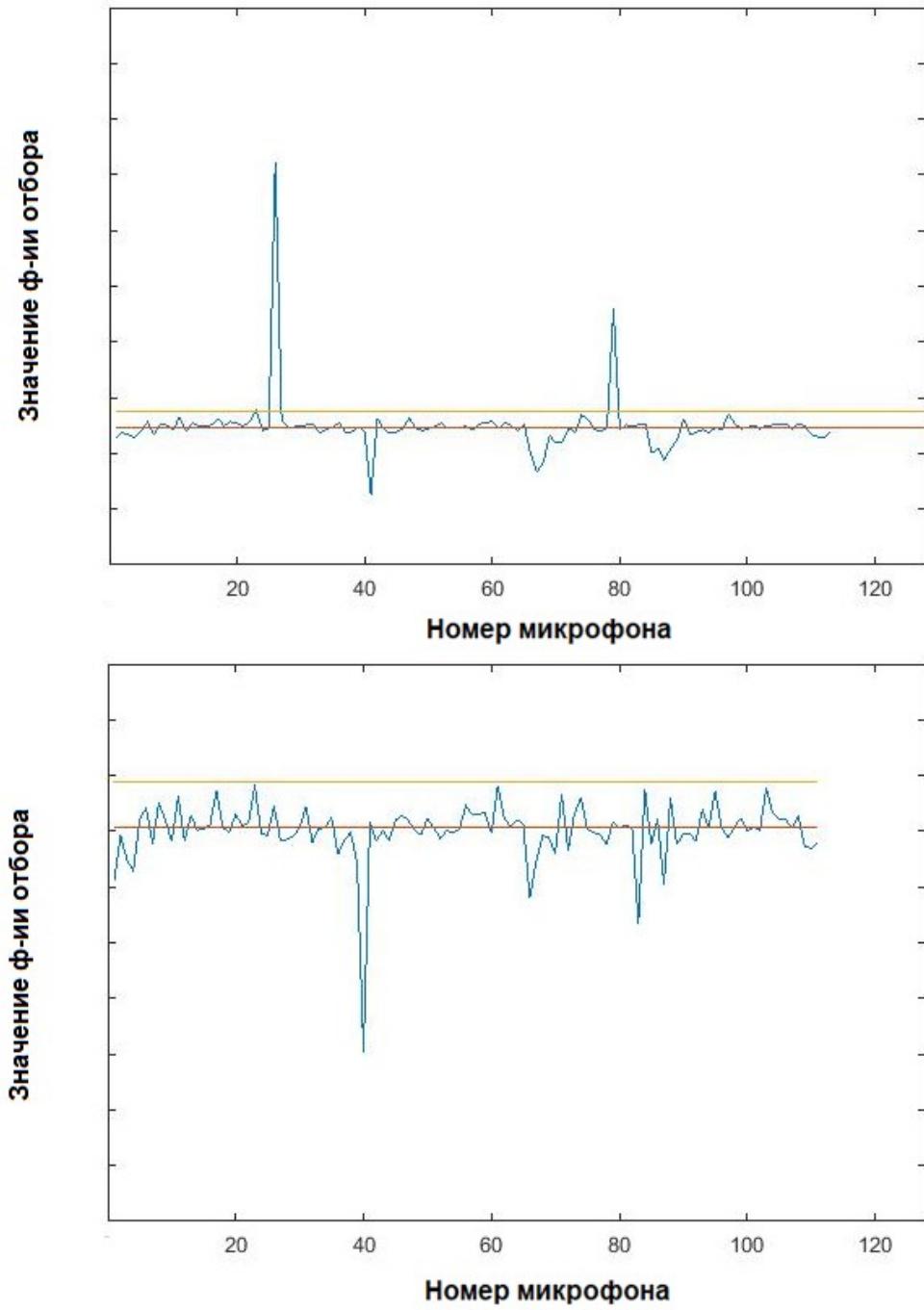


Рис. 3.12. Удаление аномальных микрофонов из массива, вверху функция 3.3 – до удаления, внизу – после, отмечена медиана и пороговое значение

3.8 Заключение по третьей главе

В данной главе для решения задачи нахождения аномальных измерений на датчиках предложен оригинальный алгоритм, работающий по принципу проекционных алгоритмов. На модельных и экспериментальных данных показано, что предложенный подход позволяет обнаруживать различного рода аномальные приёмники. Особенностью разработанного алгоритма является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментально получаемых данных. С помощью эксперимента и имитационного моделирования продемонстрирована эффективность предложенного алгоритма в задачах локализации одного и двух виброисточников. Показана эффективность алгоритма в задаче диагностики приемной микрофонной системы для локализации источников плоских волн. Алгоритм обладает высоким потенциалом развития (применение других целевых функций отбора), а также может быть полезен и в других приложениях, где решение обратной задачи происходит с использованием численной или аналитической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертационной работы и следующие из них теоретические и практические выводы могут быть сформулированы следующим образом:

1. На основе принципа максимума правдоподобия разработаны методы локализации единственного виброисточника. Первый метод получен строгим выводом из метода максимума правдоподобия, второй метод является его упрощенной модификации и основан на использовании первого собственного вектора выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала виброускорений. Экспериментально и численно показано, что разработанные методы обладают более высокой эффективностью в задаче локализации в сравнении с ранее применяемыми алгоритмами.
2. Получена модификация метода MUSIC, позволяющая решить задачу локализации нескольких работающих виброисточников. Модифицированный метод апробирован численно и в экспериментах с несколькими конструкциями. Показано, что модифицированный метод MUSIC обладает большей эффективностью при решении задачи локализации с двумя источниками в сравнении с методом наименьших квадратов и методом максимума правдоподобия, рассчитанными на единственный источник. Экспериментально продемонстрирована возможность правильной оценки числа одновременно работающих виброисточников по спектру собственных чисел выборочной корреляционной матрицы сигналов виброускорений.

3. Для решения задачи определения различного рода аномалий данных на вибродатчиках и минимизации их влияния на результат решения обратной задачи предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным алгоритмам. Экспериментально и численным моделированием показано, что предложенный подход позволяет обнаруживать аномальные приёмники различного рода. Главной особенностью алгоритма является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Эффективность алгоритма продемонстрирована в задаче локализации виброисточников в разных конфигурациях. Также применимость разработанного алгоритма показана в задаче диагностики приемных систем для локализации источников плоских волн. Разработанный алгоритм может быть использован и в других приложениях, где решение обратной задачи происходит с использованием численной или аналитической модели.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю кандидату физико-математических наук Родинову А.А. за помощь и содействие в подготовке настоящей диссертационной работы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

FRF – frequency response function

MFP – matched – field Processing

КЭМ – конечно-элементного моделирование

МНК – метод наименьших квадратов

ОСШ – отношение сигнал/шум

SHM – structural health monitoring

MAC – modal assurance criterion

EI – effective independence

MKE – modal kinetic energy

PCA – principal component analysis, метод главных компонент

ANN – artificial neural network

EMD – empirical mode decomposition

MUSIC – multiple signal classification

МП – максимум правдоподобия

ФП – функция правдоподобия

CPV – cumulative percent variance

MAD – median absolute deviation

МПКС – максимально правдоподобная классификация сигналов

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Baggeroer A. B. Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem / A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, H. Schmidt // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1988. – Vol. 83. – No. 2. – P. 571–587.
2. Baggeroer A. B. An overview of matched field methods in ocean acoustics / A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, P. N. Mikhalevsky // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1993. – Vol. 18. – No. 4. – P. 401–424.
3. Kundu T. Acoustic source localization // Ultrasonics. – 2014. – Vol. 54. – No. 1. – P. 25–38.
4. Chen J. C. Acoustic source localization and beamforming: theory and practice / J. C. Chen, K. Yao, R. E. Hudson // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2003. – Vol. 2003. – P. 1–12.
5. Kuznetsov G. N. Noise Source Localization in Shallow Water / G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, I. V. Kaznacheev // Physical Wave Phenomena. – 2017. – Vol. 25. – No. 2. – P. 156.
6. Kilseok C. Parallel algorithms for adaptive matched-field processing on distributed array systems / C. Kilseok, A. George, R. Subramaniyan, K. Keonwook // Journal of Computational Acoustics. – 2004. – Vol. 12. – No. 2. – P. 149–174.
7. Corciulo M. Multiscale matched-field processing for noise-source localization in exploration geophysics / M. Corciulo [et al.] // Geophysics. – 2012. – Vol. 77. – No. 5. – P. KS33–KS41.
8. Tuncer T. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation / T. Tuncer, B. Friedlander. – Elsevier Science, 2009. – 429 pp.
9. Wilson T. L. Tools of Radio Astronomy / T. L. Wilson, K. Rohlfs, S. Hüttemeister. – Berlin: Springer, 2009. – Vol. 5. – 520 pp.

10. Rosłoniec S. Fundamentals of the Radiolocation and Radionavigation. – Springer, 2023.
– 492 pp.
11. Saleem M. M. Impact force localization for civil infrastructure using augmented Kalman Filter optimization / M. M. Saleem, H. Jo // Smart Structures and Systems. – 2019. – Vol. 23. – No. 2. – P. 123–139.
12. Попков В. И. Вибраакустическая диагностика и снижение вибраактивности судовых механизмов. – Л: Судостроение, 1974.
13. Goutaudier D. Impact localization on a composite fuselage with a sparse network of accelerometers // Comptes Rendus Mecanique. – 2020. – Vol. 348. – P. 191–209.
14. Seydel R. Impact identification of stiffened composite panels: I. System development / R. Seydel, Fu-Kuo Chang // Smart Materials and Structures. – 2001. – Vol. 10. – P. 354.
15. Bartlett W. G. Model verification of force determination for measuring vibratory loads / W. G. Bartlett, F. D. Flannelly // Journal of the American Helicopter Society. – 1979. – Vol. 24. – No. 2. – P. 10–18.
16. Xu J. Estimation of Aircraft Engine Mount Dynamic Forces based on Least-Squares Scheme / J. Xu, H. Feng, H. Zhao, C. Li // Proceedings of 2019 the 9th International Workshop on Computer Science and Engineering. – Hong Kong, 15–17 June, 2019.
17. Б. Н. Костюков, А. П. Науменко. Основы вибраакустической диагностики и мониторинга машин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011.
18. Van Trees H. L. Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory. – New York : John Wiley & Sons, 2002.
19. Havelock D. I. Handbook of signal processing in acoustic. – New York : Springer, 2008.
– 2000 pp.
20. Ред. В. Н. Челомей (пред.). Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. — М.: Машиностроение, 1980
21. Turek G. Applications of matched-field processing to structural vibration problems / G. Turek, W. Kuperman // Journal of the Acoustical Society of America. – 1997. – Vol. 101. – P. 1430–1440.
22. Petyt M. Introduction to finite element vibration analysis. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 500 pp.

- 23.Li Q. Force localization and reconstruction using a two-step iterative approach / Q. Li, Q. Lu // Journal of Vibration and Control. – 2018. – Vol. 24. – No. 17. – P. 3830–3841.
- 24.Yan G. Impact load identification for composite structures using Bayesian regularization and unscented Kalman filter / G. Yan, H. Sun, O. Büyüköztürk // Structural Control and Health Monitoring. – 2017. – Vol. 24. – P. e1910.
- 25.Zhou P. Determining excitation forces acting on the interior surface of an enclosure. Part II: Numerical simulations / P. Zhou, S. Wu, Y. Lu // Journal of Theoretical and Computational Acoustics. – 2022. – Vol. 30. – No. 1.
- 26.Liu Y. Dynamic force identification based on enhanced least squares and total least-squares schemes in the frequency domain / Y. Liu, W. Shepard // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 282. – No. 1–2. – P. 37–60.
- 27.Staszewski W. Impact location and quantification on a composite panel using neural networks / W. Staszewski, K. Worden // Strain. – 2000. – Vol. 36. – No. 2. – P. 61–68.
- 28.Sharif-Khodaei Z. Determination of impact location on composite stiffened panels / Z. Sharif-Khodaei, M. Ghajari, M. Aliabadi // Smart Materials and Structures. – 2012.
- 29.Zhao G. Localization of impact on composite plates based on integrated wavelet transform and hybrid minimization algorithm / G. Zhao, H. Hu, S. Li, L. Liu, K. Li // Composite Structures. – 2017. – Vol. 176. – P. 234–243.
- 30.Frieden J. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors – Part I: Impact detection and localization // Composite Structures. – 2012. – Vol. 94. – P. 438–445.
- 31.Gaul L. Identification of the impact location on a plate using wavelets / L. Gaul, S. Hurlebaus // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1998. – Vol. 12. – No. 6. – P. 783–795.
- 32.Валеев А. Р. Диагностика промышленного оборудования и локализация дефектов с использованием совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров / А. Р. Валеев [и др.] //Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7. – №. 2 (24). – С. 83-92.

33. Feng W. Group relevance vector machine for sparse force localization and reconstruction / W. Feng, Q. Li, Q. Lu, C. Li, B. Wang // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 161. – P. 107900.
34. Feng W. Force localization and reconstruction based on a novel sparse Kalman filter / W. Feng, Q. Li, Q. Lu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 144. – P. 106890.
35. Mahdavi F. A wavelet-based scheme for impact identification of framed structures using combined genetic and water cycle algorithms / F. Mahdavi, R. Rofooei, A. Sadollah, C. Xu // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 443. – P. 25–46.
36. Souleymane S. Reconstruction of multiple impact forces by wavelet relevance vector machine approach / S. Souleymane, A. Khamlichi, A. Driouach, E. Jacquelin // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – Vol. 359. – P. 56–67.
37. Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. – 1970.
38. Kaya Y. Real-time analysis and interpretation of continuous data from structural health monitoring (SHM) systems / Y. Kaya, E. Safak // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2015. – Vol. 13. – P. 917–934.
39. Артельный П. В. Экспериментальная реализация метода поиска источников виброактивности и эксплуатационных дефектов в сложных конструкциях / П. В. Артельный [и др.] // Акустический журнал. – 2011. – Т. 57. – № 1. – С. 13–23.
40. Wirsching P. H. Random vibrations: theory and practice. Mineola : Courier Corporation, 2006. – 448 pp.
41. Родионов А. А. Адаптивная обработка сигналов в антенных решетках с использованием метода максимума правдоподобия / А. А. Родионов, В. И. Турчин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52, № 4. – С. 343–354.
42. Суворов А. С. Регулярный алгоритм автоматической корректировки спектральных характеристик акустических конечно-элементных моделей / А. С. Суворов, Е. М. Соков, И. А. Вьюшкина // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62. – № 5. – С. 592–599.
43. Pástor M. Modal Assurance Criterion / M. Pástor, M. Binda, T. Harčarik // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 48. – P. 543–548.

44. Lee E.-T. Optimal sensor placements using modified Fisher information matrix and effective information algorithm / E.-T. Lee, H.-C. Eun // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2021. – Vol. 17. – No. 6.
45. Heo G. Optimal transducer placement for health monitoring of long span bridge / G. Heo, M. L. Wang, D. Satoathi // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 1997. – Vol. 16. – P. 495–502.
46. Rao C. R. Handbook of Statistics / C. R. Rao, T. S. Rao (ed.). – Elsevier Science & Technology, 2012.
47. Teh H. Sensor data quality: a systematic review / H. Teh, A. Kempa-Liehr, K. Wang // Journal of Big Data. – 2020. – Vol. 7. – No. 11.
48. Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components // Journal of Educational Psychology. – 1933. – Vol. 24. – No. 6. – P. 417–441.
49. De Boe P. Principal Component Analysis of a Piezosensor Array for Damage Localization / P. De Boe, J.-C. Golinval // Structural Health Monitoring. – 2003. – Vol. 2. – No. 2. – P. 137–144.
50. Golub G. H. Matrix Computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1996.
51. Pirra M. PCA algorithm for detection, localisation and evolution of damages in gearbox bearings / M. Pirra, E. Gandino, A. Torri, L. Garibaldi, J. Machorro-Lopez // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – Vol. 305.
52. Tibaduiza B. A Sensor Fault Detection Methodology applied to Piezoelectric Active Systems in Structural Health Monitoring Applications // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138.
53. Ricardo D. Use of principal component analysis for sensor fault identification / D. Ricardo, S. J. Qin, F. E. Thomas, J. Thomas // Computers & Chemical Engineering. – 1996. – Vol. 20. – No. 1. – P. 713–718.
54. Xu C. Sensor fault detection and diagnosis in the presence of outliers / C. Xu, S. Zhao, F. Liu // Neurocomputing. – 2019. – Vol. 349. – P. 156–163.

55. Abu-Mahfouz I. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – No. 7. – P. 707–720.
56. Zonzini F. Machine Learning Meets Compressed Sensing in Vibration-Based Monitoring / F. Zonzini, A. Carbone, F. Romano, M. Zauli, L. De Marchi // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – No. 6.
57. Kunpeng Z. Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results / Z. Kunpeng, W. Yoke San, H. Geok Soon // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49. – No. 7–8. – P. 537–553.
58. Diez-Olivan A. A clustering approach for structural health monitoring on bridges / A. Diez-Olivan, K. Nguyen, A. Makki, W. Mehrisadat // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2016. – Vol. 6. – P. 429–445.
59. Matej Ž. Multivariate and multiscale monitoring of large-size low-speed bearings using Ensemble Empirical Mode Decomposition method combined with Principal Component Analysis / Ž. Matej, Z. Samo // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2010. – Vol. 24. – No. 4. – P. 1049–1067.
60. Kutuzov N. A. Study of the possibility of localizing multiple vibration sources in a mechanoacoustic system with a large number of degrees of freedom/ N. A. Kutuzov, A. A. Rodionov, A. V. Stulenkov, A.S.Suvorov // Acoustical Physics. – 2020. – Vol. 66. – No 3. – P. 313–319.
61. Kutuzov N. A. Localization of Multiple Vibration Sources Using a Modified MUSIC Algorithm / N. A. Kutuzov, A. A. Rodionov, A. V. Stulenkov // Physics of Wave Phenomena. – 2024. – Vol. 32. – No. 1. – P. 56–66.
62. Кутузов Н. А. Проекционный метод определения аномальных датчиков в задачах виброакустики / Н. А. Кутузов, А. А. Родионов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2024. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec24/8/text.pdf>
63. Родионов А. А. Исследование эффективности модификации сверхразрешающих алгоритмов для локализации виброисточников / А. А. Родионов, А. С. Суворов, Н. А. Кутузов, А. В. Стulenков // Труды XXIII научной конференции по

- радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н. А. Железцова. – Н. Новгород: ННГУ, 2019 – С. 370–373.
64. Родионов А. А. Модификация метода MUSIC для поиска источников вибрационной активности в сложных системах / А. А. Родионов, А. С. Суворов, Н. А. Кутузов, А. В. Стulenkov // Материалы докладов 24 Нижегородской сессии молодых ученых. – Н. Новгород: НРЛ, 2019. – С. 181–182.
65. Суворов А. С. Локализация источников вибраактивности в сложных системах / А. С. Суворов, Н. А. Кутузов, А. А. Родионов, А. В. Стulenkov // Труды XXXII сессии РАО. – 2019. – С. 1377–1384.
66. Kutuzov N. A. Modified MUSIC algorithm for vibration source localization / N. A. Kutuzov, A. A. Rodionov, A. V. Stulenkov // Динамика и вибраакустика машин: тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции. – Самара: Самарский университет, 2020. – С. 75.
67. Кутузов Н. А. Проекционный подход в анализе аномальных датчиков в задачах, связанных с измерением вибраакустических полей / Н. А. Кутузов, А. А. Родионов // Труды XXVIII Научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2024. – С. 333–336.
68. Кутузов Н. А., Родионов А. А. Проекционный метод обнаружения аномальных значений на датчиках в вибраакустических задачах // Сборник трудов XXXV сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2024. – С. 483–488
69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661249 “CATEC” Севрюков О.Ф., Соков Е.М., Суворов А.С., Евстифеев В.В., Коновалов К.С., Львова Д.А., Родионов А.А., Салин М.Б., Кутузов Н.А., Стulenков А.В.
70. Турчин В. И. Введение в современную теорию оценки параметров сигналов. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005.
71. Liu Y. Dynamic force identification based on enhanced least squares and total least-squares schemes in the frequency domain / Y. Liu, W. Shepard // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 282. – No. 1–2. – P. 37–60.

72. Dobson B. J. A review of the indirect calculation of excitation forces from measured structural response data / B. J. Dobson, E. Rider // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science. – 1990. – Vol. 204. – No. 2. – P. 69–75.
73. Krim H. Two decades of array signal processing research: the parametric approach / H. Krim, M. Viberg // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – Vol. 13. – No. 4. – P. 67–94.
74. Valle S. Selection of the Number of Principal Components: The Variance of the Reconstruction Error Criterion with a Comparison to Other Methods / S. Valle, W. Li, S. J. Qin // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1999. – Vol. 38. – No. 11. – P. 4389–4401.
75. Huber P. J. Robust Statistics. – New York: John Wiley and Sons, 1981. – 308 pp.
76. Leys C. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median / C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard, L. Licata // Journal of Experimental Social Psychology. – 2013. – Vol. 49. – No. 4. – P. 764–766.
77. DeVore R. A. Some remarks on greedy algorithms / R. A. DeVore, V. N. Temlyakov // Advances in Computational Mathematics. – 1996. – Vol. 5. – No. 1. – P. 173–187.
78. Dumitrescu B. Sparse total least squares: Analysis and greedy algorithms // Linear Algebra and Its Applications. – 2013. – Vol. 438. – No. 6. – P. 2661–2674.
79. Heilmann G. Time-domain Beamforming using 3D-microphone arrays / G. Heilmann, A. Meyer // Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. – Berlin, Germany, 19–20 February, 2008. – Art. No. 4.
80. Silverman H. F. The huge microphone array / H. F. Silverman, W. R. Patterson, J. L. Flanagan // IEEE Concurrency. – 1998. – Vol. 6. – No. 4. – P. 36–46.
81. Wang W. Robust Differentiable SVD / W. Wang, Z. Dang, Y. Hu, P. Fua, M. Salzmann // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 44. – No. 9. – P. 5472–5487.

82.Родионов А. А. Обработка сигналов в антенных решётках на основе модели помехи, включающей корреляционную матрицу неполного ранга / А. А. Родионов, В. И. Турчин // Известия вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 60–71.