Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиофизики (РФ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП
д-р физ. мат. наук, профессор
_____ В. П. Якубов
«10» 06 2016 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕШЁТКИ МИКРОФОНОВ

по основной образовательной программе подготовки магистров
направление подготовки 03.04.03 – Радиофизика

Ерзакова Надежда Николаевна

Научный руководитель ВКР
д-р. физ.-мат. наук, доцент
_____ Д. Я. Суханов
подпись
«6» 06 2016 г.

Автор работы
студент группы № 700
_____ Н. Н. Ерзакова
подпись

Томск 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 ЗВУКОВИДЕНИЕ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА 8
1.1 Гидролокатор с синтезированной апертурой 8
1.2 Звуковидение в воздухе 10
1.3 Обнаружение выстрелов из стрелкового оружия 10
1.4 Методы определения положения источника звука 13
1.5 Существующие технологии микрофонных решеток и их применение 14
2 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗВУКОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ 16
2.1 Метод визуализации на основе одновременных многопозиционных звуковых измерений 16
2.1.1 Схема измерений поля 16
2.1.2 Математическая модель задачи 16
2.1.3 Восстановление изображения объекта 18
2.1.4 Восстановление изображения объекта в широкой полосе частот 19
2.2 Метод визуализации на основе неодновременных многопозиционных измерений 21
2.2.1 Схема измерений 21
2.2.2 Математическая модель и решение прямой задачи 22
2.2.3 Метод амплитудной широкополосной пространственно - согласованной фильтрации 24
2.3 Определение дальности до излучающего объекта 25
2.4 Определение направления на источник излучения 27
2.5 Приёмная решётка микрофонов с параллельной оцифровкой 32
2.6 Численное моделирование двумерной решётки 34
2.7 Аналитическая оценка локализации изображения по дальности 37
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 40
3.1 Описание двумерной решётки микрофонов 40
3.2 Результаты экспериментальных исследований 43
3.2.1 Эксперимент с параллельной оцифровкой линейной решёткой микрофонов 43
3.2.2 Экспериментальные исследования с помощью двумерной решётки микрофонов 46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 50
ПРИЛОЖЕНИЕ А 53

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Работа изложена на 54 страницах машинописного текста, включая 8 страниц обзора по данному вопросу. Использовано 24 источника литературы. Работа содержит 50 рисунков, 30 формул и 1 таблиц.

СИНТЕЗИРОВАННАЯ АПЕРТУРА, УЛЬТРАЗВУК, ЗВУКОВИДЕНИЕ, ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, МАТРИЦА МИКРОФОНОВ, ЗВУКОИЗЛУЧАЮЩИЙ ОБЪЕКТ, МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННО – СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ.

В диссертации предложен метод визуализации источников звука с произвольным спектром в слышимом диапазоне частот на основе двумерной приемной решётки микрофонов с параллельной оцифровкой сигналов.

Целью магистерской диссертации является разработка метода визуализации источников акустических волн в воздухе по дистанционным измерениям звукового поля с помощью решётки микрофонов.

В результате проделанной работы была создана прямоугольная двумерная решётка из 160 микрофонов с апертурой 90 см на 90 см. Предложен алгоритм обработки сигналов для визуализации произвольных источников звука. Разработано программное обеспечение, позволяющее в реальном масштабе времени, с частотой 10 кадров в секунду визуализировать источники звука. Проведенные исследования являются оригинальными в части обработки сигналов сочетающей когерентные и некогерентные подходы. В части технического исполнении микрофонной решётки, предложено решение усиления сигналов микрофонов после мультиплексирования при этом на каждый электретный микрофон подается смещающее напряжение через отдельный резистор.

Разработанные технологии могут быть использованы для дефектоскопии работающих механизмов. Кроме того, может применяться в качестве дистанционного микрофона.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность осуществить визуализацию объектов с помощью звуковых волн, способных распространяться в оптически непрозрачных средах, всегда привлекала инженеров. В связи с развитием средств автоматизации производства, требуется внедрение технологий автоматизированного контроля качества производимой продукции, а также контроля состояния технологического оборудования. Одним из наиболее простых методов контроля состояния технологических линий является метод виброакустической диагностики [1]. Данный метод позволяет определять состояние работающих механизмов по спектрам акустических сигналов излучаемых ими. Если спектр сигнала начинает меняться, то это говорит об отклонении режима работы механизма от нормы в результате поломки или износа деталей. Однако существующие технологии, в основном, требуют контактного измерения колебаний объекта и не позволяют дистанционно визуализировать звукоизлучающий объект.

Существуют методы визуализации объектов с помощью ультразвуковых волн через иммерсионную среду [2]. Подобные методы позволяют визуализировать объекты произвольной формы, а также исследовать их внутреннюю структуру. Однако требуется погружать объект в жидкость, что не всегда допустимо.

Звуковое видение в воздухе является перспективным направлением развития дефектоскопии [3], поскольку не требует использования иммерсионных жидкостей. Основной сложностью в применении звуковидения в воздухе для исследования внутренней структуры объектов является сильное отражение звуковых волн от границы раздела воздух - плотная среда. Но если сам объект является звукоизлучающим, то распределение колебаний на его поверхности может содержать информацию о внутренней структуре объекта. Колебания поверхности передаются по воздуху и могут быть измерены. Далее по измеренным звуковым сигналам, путем обработки, возможно восстановление характера колебаний поверхности объекта.

Кроме того, визуализация звуковых полей позволят осуществлять место определение источников звука любой природы, например: человеческая речь, звук автомобильных двигателей, бытовые приборы, акустические системы и другие.

Таким образом, создание «аудио камеры» является достаточно актуальной задачей.

В данной работе в качестве **объекта исследований** взяли акустические поля распределённых источников.

Целью магистерской диссертации является разработка метода визуализации источников акустических волн в воздухе по дистанционным измерениям звукового поля с помощью решётки микрофонов.

Для достижения цели было необходимо решить следующие **задачи:**

1. Разработать численную модель распространения акустических волн в однородной среде.
2. Разработать метод восстановления изображений произвольных широкополосных источников звука.
3. Разработать экспериментальную установку в виде двумерной решётки микрофонов с одновременной оцифровкой сигналов.
4. Разработать программное обеспечение для визуализации источников звука в реальном масштабе времени.
5. Провести экспериментальные исследования с использованием в качестве источника звука шумовой широкополосный сигнал.

Таким образом, **предметом исследований** в работе является модель процесса восстановления акустического поля распределённых источников.

На защиту выносятся следующие научные положения.

1. Восстановление изображений звукоизлучающих объектов осуществимо путём суммирования амплитуд звуковых полей полученных методом пространственно – согласованной фильтрации на каждой из измеренных частот при условии сохранения пространственной когерентности измеренного поля.

2. Область локализации источника по дальности при обнаружении широкополосного источника звука методом фокусировки и амплитудного суммирования в широкой полосе частот определяется размерами аппретуры системы и максимальной частотой в спектре сигнала и не зависит от ширины полосы сигнала.

Достоверность полученных результатов определяется тем, что результаты математического моделирования системы звуковидения согласуются с экспериментальными результатами, полученными на прямоугольной решётке из 160 элементов микрофонов.

Научная новизна положений выносимых на защиту.

1. Предложен новый метод визуализации широкополосных источников звука на основе многопозиционных измерений акустического поля.
2. Определены параметры, влияющие на локализацию восстановленного изображения по дальности получаемого методом фокусировки и амплитудного суммирования.

Практическая значимость научных положений выносимых на защиту.

1. Первое положение, имеет практическое значения для визуализации источников звука в плоскости фокусировки параллельной плоскости решётки.
2. Второе положение выносимое на защиту, имеет практическое значение для оценки дальности до источника звука.

Предложенные методы найдут применение: в дефектоскопии изделий из звукопроводящих материалов; для обнаружения источников звука в системах безопасности; для создания дистанционных микрофонов фокусирующихся на выбранной области пространства.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 4 международных конференциях, а также по теме магистерской диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 2 статьи в журнале «Известия ВУЗов. Физика», который включен в международные библиографические базы данных. Результаты интеллектуальной деятельности подтверждены патентом Российской Федерации на полезную модель регистрационный № 2014147610 от 26.11.2014 г.

1. Sukhanov D. Ya., Erzakova N.N. Image restoration of sound source objects using the linear array of scanning microphones // International Crimean conference microwave and telecommunication technology (CRIMICO). Proceedings. – 2014. – P. 950-951

2. Sukhanov D. Ya., Erzakova N.N. Three – deminshional ultrasound tomography using multi–angle bistatic sounding // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – 2015. – P.203–206.
3. Д.Я. Суханов, Н.Н. Ерзакова. Ультразвуковая томография с круговым сканированием линейной решёткой микрофонов // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VI научно-практической конференции, 2015.– С. 230-235.
4. Sukhanov D. Ya., Erzakova N.N. Визуализация источников звука на основе синхронной двумерной микрофонной решётки микрофонов // International Crimean conference microwave and telecommunication technology (CRIMICO).
   Proceedings. – 2015. – P. 968-969.
5. Д.Я. Суханов, Н.Н. Ерзакова. Локационная ультразвуковая томография с применением линейной решётки микрофонов // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т.58. – №8/3. – С.88–91.
6. Д.Я. Суханов, Н.Н. Ерзакова. Modeling of location sensing considering diffraction effect // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т.58. – №10/3. – С.259–262.

Личный вклад автора.

Общая постановка и обоснование задач исследований, обсуждение полученных результатов были выполнены автором совместно с научным руководителем. Личный вклад автора также заключается в создании микрофонной решётки для параллельной оцифровки звуковых сигналов, проведение ряда экспериментов, что подтверждает её высокую квалификацию. Проводила обработку и анализ полученных данных и представляла результаты исследований на конференциях.

1 Звуковидение и виброакустическая диагностика

1.1 Гидролокатор с синтезированной апертурой

Гидролокаторы бокового обзора были разработаны для получения изображения дна океана, подобно радиолокаторам бокового обзора, предназначенным для картографирования местности. Однако простой перенос методов радиолокации в гидроакустику оказался невозможным, поскольку скорости распространения звуковых и электромагнитных сигналов отличаются более чем на пять порядков величины. В связи с этим главная трудность заключалась в обработке информации, полученной с гидролокатора, для однозначного определения расстояния до объекта. Одним из методов устранения подобной трудности является метод синтезированной апертуры, т.е. двухступенчатый метод: принятые приемные сигналы сначала вводятся в запоминающее устройство, а затем путем некоторой обработки формируется изображение [2].

Гидролокатор бокового обзора (ГБО) является разновидностью активного гидролокатора, позволяющего поставить в соответствие, обследуемого участка поверхности дна его тоновое изображение, формируемое при перемещении ГБО. Построчно на экране электронного средства отображения.

Элементами ГБО являются, регистратор (монитор) и гидроакустическая антенна, схематически изображены на рисунке 1.1.

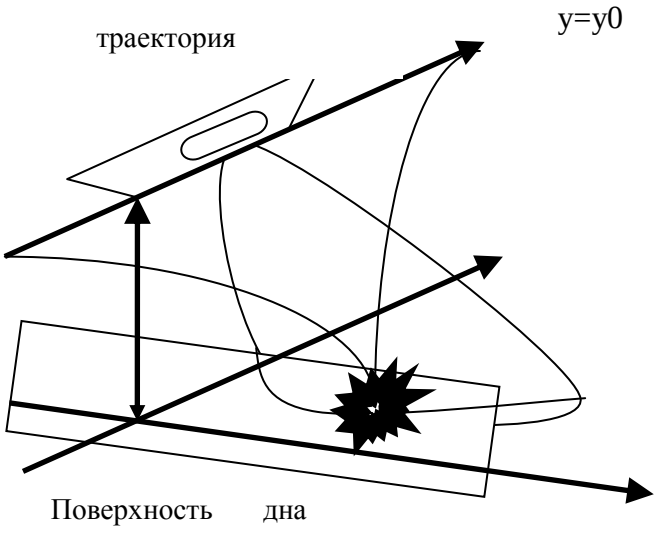


Рисунок 1.1 – Схема гидролокатора бокового обзора

Антенна имеет, широкую диаграмму направленности, ориентированную в вертикальной плоскости. В процессе съемки дна антенна, закреплена на корпусе судна. Разрешение по оси y получается благодаря использованию коротких импульсов, а разрешение по оси x получается за счёт синтезирования апертуры вдоль траектории движения локатора. Принятые акустические эхо - сигналы преобразуются антенной в электрические сигналы, которые после усиления и соответствующей предварительной обработки для модуляции яркости строки экрана монитора в соответствии с амплитудой принятого сигнала.

В результате многократного повторения рассматриваемого цикла на экране монитора построчно формируется изображение поверхности дна океана, каждой точке которого соответствует небольшой участок дна.

Существуют различные подходы к восстановлению изображений поверхности. Одним из подходов является метод пространственно - согласованной фильтрации. В данном методе основным моментом является приближение однократного рассеяния. Важнейшую роль играет реакция системы на точечный рассеиватель (1.1):

$$U_0(x,\omega) = \frac{e^{2ik\sqrt{(x-x')^2+(y_0-y')^2+h^2}}}{\sqrt{(x-x')^2+(y_0-y')^2+h^2}}\ , \qquad (1.1)$$

где (x', y') - координата точечного рассеивателя на плоскости, y_0 - положение прямолинейной траектории сканирования относительно оси y, x - текущая координата гидролокатора, h - высота траектории сканирования над поверхностью.

Для произвольного распределения рассеивателей на поверхности, поле в точке измерения получим, проинтегрировав дважды выражение (1.1) помножив его на $\rho(x',y')$, получаем выражение:

$$U(x,\omega) = \iint \frac{e^{2ik\sqrt{(x-x')^2+(y_0-y')^2+h^2}}}{\sqrt{(x-x')^2+(y_0-y')^2+h^2}} * \rho(x',y')\,dx'\,dy', \qquad (1.2)$$

где $U(x,\omega)$ - реакция на произвольный рассеиватель, $\rho(x',y')$ - коэффициент рассеяние поверхности.

Решение обратной задачи записывается в виде операции пространственно - согласованной фильтрации:

$$P(x',y') = \iint_{x,\omega} U(x,\omega)\frac{e^{-2ik\sqrt{(x-x')^2+(y_0-y')^2+h^2}}}{\sqrt{(x-x')^2+(y_0-y')^2+h^2}}dxd\omega, \quad (1.3)$$

где $P(x',y')$ - восстановленное изображение исследуемой поверхности.

1.2 Звуковидение в воздухе

Современное звуковидение представляет собой активно развивающееся направление в акустике. Спектр его практических применений очень широк: виброакустическая диагностика, дефектоскопия различных материалов и конструкций, поиск объектов под водой, получение изображений скрытых объектов и многое другое. И в настоящее время задачи о разработке различных методов звуковидения очень актуальны. В связи с этим в звуковидении используются акустические колебания в очень широком диапазоне частот от 1 Гц до нескольких ГГц. Человек способен воспринимать и анализировать акустический информационный образ только в том случае, когда этот образ становится «видимым». Получается наблюдатель, должен иметь контакт с самим объектом [2].

Существуют приборы звуковидения в жидкости. Звуковидение в воздухе используется в качестве средств машинного видения для ориентации роботов в пространстве.

1.3 Обнаружение выстрелов из стрелкового оружия

В условиях обострения террористической и криминальной активности вопросы обеспечения безопасности становятся одной из актуальных задач для государства. Поэтому многие фирмы в России и за рубежом настойчиво разрабатывают системы обнаружения, распознавания и уничтожения снайперов. Так вот, например, в США (DARPA и BBN Technologies) разработали систему

обнаружения снайперов под названием «Бумеранг» [4]. Данный комплекс является пассивной акустической системой обнаружения и обработки звукового сигнала, также оборудование определяет нахождение источника звука, и выдаёт координаты стрелка противника. Система разрабатывалась для использования в экстремальных погодных условиях, на открытой местности и в городских условиях. Бумеранг устанавливается на задней части автомобиля и состоит из семи небольших микрофонов как показано рисунке 1.2. Датчики обнаруживают и измеряют как звук выстрела, так и сверхзвуковую ударную волну. Каждый микрофон сканирует звук с небольшой разницей во времени. После обработки данных, происходит определение местоположения угрозы, и выдача информации на экран дисплея. Дисплей также оборудован светодиодной подсветкой для использования в ночное время. Информация о местоположении угрозы обрабатывается очень быстро, это даёт оперативно реагировать на быстро меняющуюся ситуацию. Система просто незаменима при ведении боевых действий и обнаружении снайперского огня.

Рисунок 1.2 – Фотография системы Бумеранг

Не отстают и российские конструкторы ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» предложили российским военным систему для определения снайперов «СОВА», которая расшифровывается – система обнаружения выстрела акустическая [5].

Данный комплекс, представленный на рисунке 1.3, имеет возможность определить нахождение снайперских стрелков в реальном времени. «СОВА»

выполнена на 100 процентов из деталей отечественного производства и прошла всевозможные испытания при любых погодных и временных условиях. «СОВА» успела даже принять участие в военных действиях на Северном Кавказе. Состоит «СОВА» из специальных датчиков акустического приема и мощного компьютера. Основным узлом системы можно назвать специализированное программное решение, которое и производит все расчеты исходя из информации, поступающей с акустических датчиков.

Рисунок 1.3 – Фотография системы СОВА

Задача датчиков - постоянно передавать на компьютер информацию, поступающую на них со всех сторон. Программное обеспечение отсекает любые звуковые помехи и обрабатывает только информацию, касающуюся производства выстрела и полета боеприпаса. Вся обработка информации сводится к следующему – сначала датчики передают всю информацию, собранную из окружающего пространства на компьютер. Потом на компьютере программное решение вычисляет параметры акустической волны, на ее основе проводит расчеты траектории пролета боеприпаса и по этим данным выдает в итоге четкие координаты места, с которого произвели выстрел.

Существующие устройства показывают возможность обнаружения источников звука по измерениям звукового поля в 4 – 7 точках. Рассматриваются источники коротких импульсных сигналов.

1.4 Методы определения положения источника звука

Проблема отслеживания нескольких периодически говорящих людей довольно таки не простая. В Японии [6] нашли такой способ по обнаружению и отслеживанию говорящих людей. В этом способе применяется круговая матрица микрофонов для измерений звукового поля, показана на рисунке 1.4, которая закрепляется на потолке комнаты. С помощью фильтрации сигналов для спектра голоса каждого человека определяются частоты уникальные для каждого человека. Далее путём решения обратной задачи распространения волн восстанавливаются координаты источников. В эксперименте использовали трех говорящих людей и результаты показывают, что метод дает очень точные результаты отслеживания. На рисунке 1.5 показана траектория движения людей которые говорили.

Рисунок 1.4 – Фотография расположения трех говорящих людей

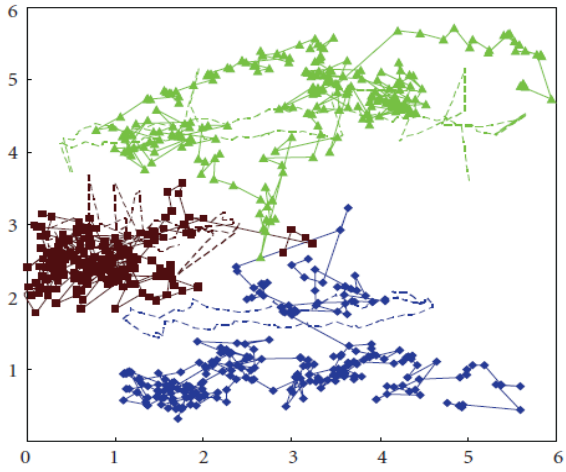


Рисунок 1.5 – Траектория движения трех говорящих людей

Таким образом, измерение звуковых сигналов решеткой микрофонов позволяет отслеживать несколько источников звука, различимых по спектру сигнала. Например, благодаря различию спектра голоса людей, можно их идентифицировать и определить их координаты.

1.5 Существующие технологии микрофонных решеток и их применение

Применение микрофонных решеток для сбора речевой информации имеет преимущества по сравнению с системами, в которых используют один микрофон. Дистанционный сбор речевой информации имеет важное значение в сфере телекоммуникаций, технологий автоматического распознавания речи, в работе правоохранительных органов и во многих других приложениях [7]. Также применении может найти на конференциях в больших аудиториях, где проходят семинары, пресс – конференции. Одними из наиболее интересных разработок являются микрофонные решетки компаний Norsonic (рисунок 1.6) и SquareHead. (рисунок 1.7) воплотившие в себе идеи неравномерного расположения микрофонов и обработки сигналов подрешеток в разных частотных полосах [8].

Компания Norsonic выпускает микрофонные решетки для решения задач технической диагностики, в частности, для построения карт акустических температур.

Рисунок 1.6 – Фотография акустической камеры Nor848A в работе

Компания SquareHead [9] дополнила эти микрофонные решетки своими собственными алгоритмами обработки и применила для решения задач дистанционного сбора речевой информации (рисунок 1.8).

Рисунок 1.7 –Фотография микрофонных решеток AMD285 компании SquareHead

В таблице 1 приведены некоторые характеристики (апертура–D, частотный диапазон–F, количество микрофонов–M) микрофонных решёток обеих компаний.

Таблица 1 – Параметры микрофонных решеток компаний Norsonic и SquareHead

Norsonic	$D = 0{,}4$ м $M = 128$ $F = 316$ Гц–15 кГц	$D = 1$ м $M = 256$ $F = 125$ Гц–15 кГц	$D = 1{,}6$ м $M = 384$ $F = 80$ Гц–15 кГц	
SquareHead	$D = 0{,}5$ м $M = 105$	$D = 1{,}05$ м $M = 225$	$D = 1{,}55$ м $M = 285$	$D = 2{,}12$ м $M = 345$

Рисунок 1.8 – Размещение микрофонной решётки компании SquareHead в конференц-зале

Схожие решения встречаются и в других разработках [10-12].

Анализ источников показал, что микрофонные решётки имеют широкий диапазон применений, они востребованы в сфере мультимедийных услуг.

Существующие решения визуализации акустических температур рассчитаны на измерения в дальней зоне. Необходима разработка методов визуализации в ближней зоне для источников с произвольным спектром. При этом алгоритмы должны быть достаточно быстродействующими, чтобы производить восстановление изображений в реальном масштабе времени.

2 Визуализация звукоизлучающих объектов

2.1 Метод визуализации на основе одновременных многопозиционных звуковых измерений

2.1.1 Схема измерений поля

Схема измерений представлена на рисунке 2.1. Предполагается, что объект излучает акустические волны в широкой полосе частот, а решётка микрофонов позволяет одновременно измерять звуковое поле заданный интервал времени с частотой дискретизации вдвое выше максимальной частоты в спектре излучения объекта.

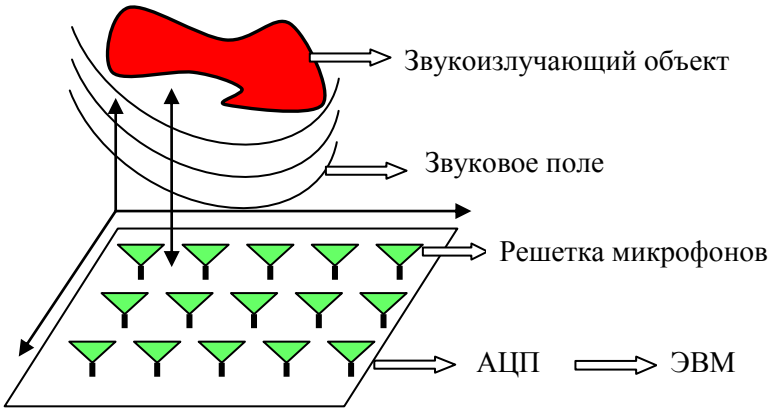


Рисунок 2.1 – Схема измерений

По многопозиционным одновременным измерениям необходимо восстановить изображение звукоизлучающего объекта.

2.1.2 Математическая модель задачи

Обозначим пространственно-временное распределение источников функцией $\mathrm{A}(\mathbf{r},t)$, а в спектральной области распределение источников $\tilde{\mathrm{A}}(\mathbf{r},\omega)$. Волновое поле в воздухе для монохроматических сигналов должно удовлетворять уравнению Гельмгольца:

$$\Delta \mathrm{U}(\mathbf{r}) + k^2 \mathrm{U}(\mathbf{r}) = -\tilde{\mathrm{A}}(\mathbf{r},\omega) \qquad (2.1)$$

Данное уравнение решается методом функции Грина. Функция Грина удовлетворяет уравнению:

$$\Delta \mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) + k^2\,\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) = -\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0), \tag{2.2}$$

где $\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) = \dfrac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}$ - функция Грина свободного пространства.

Помножив уравнение (2.1) на $\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$, а уравнение (2.2) на $\mathrm{U}(\mathbf{r})$ и вычтя из первого уравнения второе получим:

$$\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\Delta\,\mathrm{U}(\mathbf{r}) - \mathrm{U}(\mathbf{r})\Delta\,\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) = -\tilde{\mathrm{A}}(\mathbf{r},\omega)\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) + \mathrm{U}(\mathbf{r})\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0). \tag{2.3}$$

Проведём интегрирование выражения (2.3) по бесконечному объёму пространства. В результате левая часть уравнения превратиться в поверхностный интеграл (согласно второй теореме Грина) по границе бесконечного объёма. Предположим что на бесконечности, поля стремятся к нулю, следовательно, интеграл по поверхности можно принять равным нулю, то есть левая часть уравнения обращается в ноль. То есть, после интегрирования по объёму уравнение (2.3) примет вид:

$$\mathrm{U}(\mathbf{r}_0) = \iiint_V \tilde{\mathrm{A}}(\mathbf{r},\omega)\mathrm{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)d\mathbf{r}\,. \tag{2.4}$$

Выражения (2.4) является решением прямой задачи для поля звукоизлучающего объекта в воздухе. В данном решении не учитываются эффекты многократного отражения и само затенения.

Согласно выражению (2.4) было проведено численное моделирование излучения синфазного излучателя изображённого на рисунке 2.2. Действительная часть функции Грина свободного пространства представлена на рисунке 2.3.

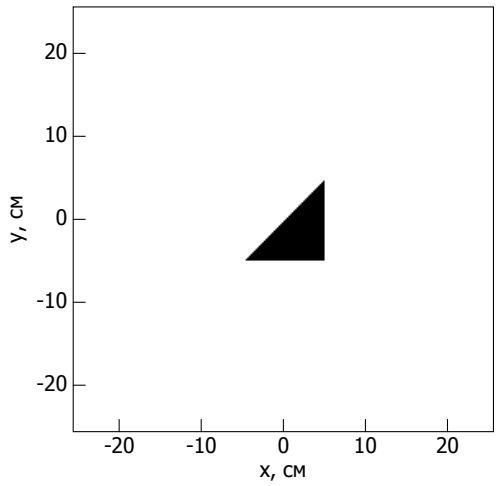


Рисунок 2.2 – Моделируемый источник звука

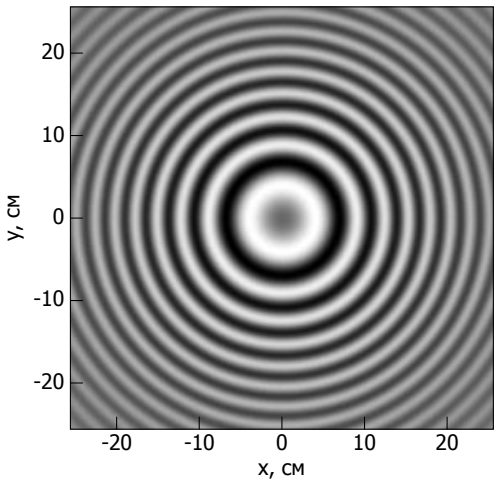


Рисунок 2.3 – Функция Грина на частоте 17 кГц на расстоянии 15 см

В результате вычислений по формуле 2.4 было получено поле, представленное на рисунке 2.4 (действительная часть).

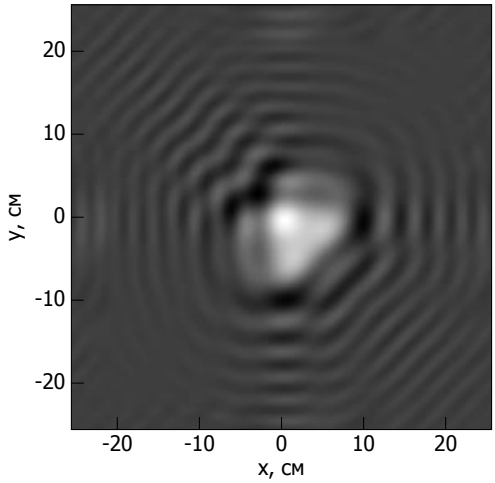


Рисунок 2.4 – Звуковое поле на частоте 17 кГц на расстоянии 15 см.

2.1.3 Восстановление изображения объекта

Восстановление изображения звукоизлучающего объекта – это обратная задача, то есть определения источника по измеренному полю. Предлагается решить данную задачу с помощью метода пространственно-согласованной фильтрации.

На отдельной частоте решение методом пространственно-согласованной фильтрации имеет вид:

$$\tilde{\mathrm{B}}(\mathbf{r},\omega)=\iiint_{V}\mathrm{U}(\mathbf{r}_0,\omega)\mathrm{G}^{*}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)d\mathbf{r}_0\,, \tag{2.5}$$

где $\mathbf{r}_0$ - множество точек, в которых измеряется поле.

В случае если измерение происходит на плоскости, то выражение (2.5) можно свести к интегралу типа свёртки:

$$\tilde{\mathrm{B}}(x,y,\omega)=\iint_{S}\mathrm{U}(x_0,y_0,\omega)\frac{e^{-ik\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+h^2}}}{4\pi\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+h^2}}dx_0dy_0\,, \tag{2.6}$$

где h - расстояние от плоскости измерений до объекта, $\tilde{\mathrm{B}}(x,y,\omega)$ - восстановленное изображение поля источника на частоте ω.

2.1.4 Восстановление изображения объекта в широкой полосе частот

Восстановление изображения объекта в широкой полосе частот сводится к восстановлению его изображения на множестве отдельных частот [14-17]. После восстановления изображений на каждой частоте, предлагается их суммировать и получить изображение объекта в широкой полосе частот, а также разрешение по дальности. Однако, данное суммирование имеет смысл, только если сигналы на всех частотах имеют известную общую точку отсчёта времени. Для произвольного звукоизлучающего объекта данное требование не выполняется, следовательно, простое суммирование по частотам не даст ожидаемого результата.

Для решения данной проблемы предлагается для каждой частоты вычислить среднюю комплексную амплитуду колебаний в плоскости измерений:

$$\sigma(\omega)=\frac{1}{S}\iint_{S}\mathrm{U}(x_0,y_0,\omega)dx_0dy_0\,. \tag{2.7}$$

Данная величина, по сути, является комплексной амплитудой плоской волны падающей по нормали к плоскости измерений.

Далее предлагается взять фазу полученной величины $\sigma(\omega)$ за точку отсчёта фазы, то есть вычесть фазу $\sigma(\omega)$ из данных измерений на соответствующих частотах:

$$\mathrm{U}_C(x_0, y_0, \omega) = \mathrm{U}(x_0, y_0, \omega)\frac{\sigma^*(\omega)}{|\sigma(\omega)|}, \tag{2.8}$$

где $\mathrm{U}_C(x_0, y_0, \omega)$ - измеренное поле с скорректированной фазой. Данная операция позволяет, некоторым образом синхронизировать между собой измерения на различных частотах, однако не позволяет установить абсолютную точку отсчёта времени. Если объект вибрирует синфазно по всей поверхности и сосредоточен в плоскости параллельной плоскости измерений, то $\sigma(\omega)$ - является спектром излучаемого сигнала сдвинутый по фазе на e^{ikh}. Если точно известно расстояние до объекта h, то можем считать, что $\sigma(\omega)e^{-ikh}$ - является спектром излучаемого сигнала, которого можно применять в корреляционной обработке измеренных данных.

То есть операция (2.8), по сути, является корреляционной обработкой измеренного сигнала позволяющая максимизировать отношение сигнал-шум.

С помощью (2.6) было восстановлено изображение моделируемого объекта на частоте 17 кГц (рисунок 2.5). Представлена C квадратура восстановленного изображения.

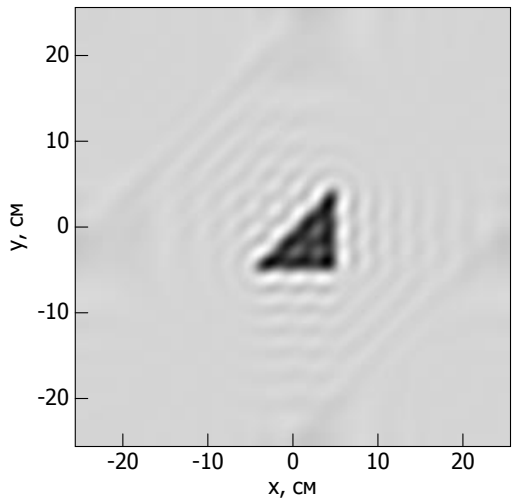


Рисунок 2.5 – Решение обратной задачи на одной частоте 17 кГц (C - квадратура)

Операция (2.6) была применена на различных частотах в полосе от 17 кГц до 28 кГц. Далее результаты восстановления изображений на различных частотах были сложены согласно выражению:

$$U_C(x_0, y_0) = \int_{\omega} U(x_0, y_0, \omega) d\omega. \quad (2.9)$$

После суммирования по частотам было восстановлено более точное изображение объекта (рисунок 2.6).

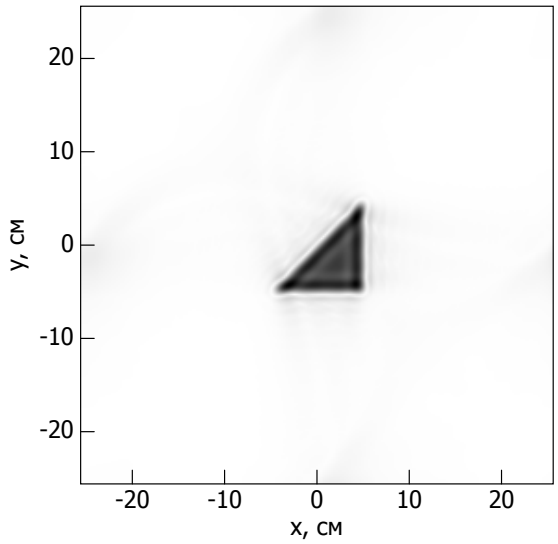


Рисунок 2.6 – Решение обратной задачи в широкой полосе частот 17-28 кГц (Амплитуда)

Следует отметить, что вместо источника сигнала как такового, может выступать отверстие в экране, за которым располагается источник. Если измеряется поле дифракции [24] на экране, то в таком случае предложенный алгоритм, позволит восстановить изображение отверстия в экране.

2.2 Метод визуализации на основе неодновременных многопозиционных измерений

2.2.1 Схема измерений

Схема измерений представлена на рисунке 2.7. Предполагается, что область измерения звукового поля плоская и находится на некотором расстоянии от звукоизлучающего объекта. Измерения поля происходят одновременно на всей

области. На основе обработки многомерного сигнала $\mathrm{U}(x,y,t)$ необходимо восстановить изображение звукоизлучающего объекта. [13-15]

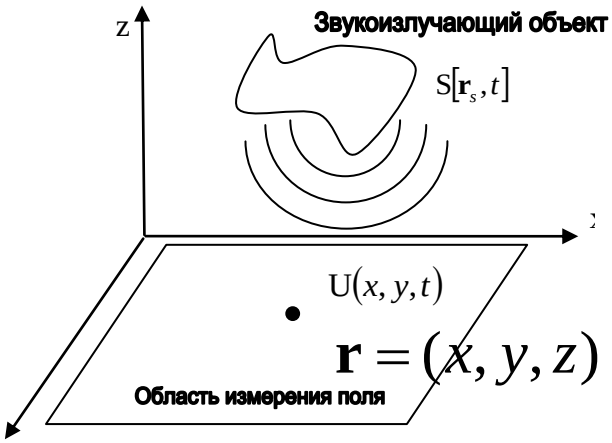


Рисунок. 2.7 – Схема измерений

2.2.2 Математическая модель и решение прямой задачи

Обозначим измеряемый сигнал $\mathrm{U}(x,y,t)$, содержащий информацию о колебаниях давления воздуха в зависимости от времени в различных точках области измерений, и сигнал, излучаемый различными точками объекта $\mathrm{S}[\mathbf{r}_s,t]$. Расстояние от рассматриваемой точки объекта до точки измерения $r=|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|=\sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2+(z-z_s)^2}$, $\mathbf{r}_s=(x_s,y_s,z_s)$ - точка объекта, $\mathbf{r}=(x,y,z)$ - точка измерения на плоскости $z=const$, $\mathrm{U}(x,y,t)$- поле в приёмнике. Запишем поле в точке измерения, исходя из решения в запаздывающих потенциалах (2.10)

$$\mathrm{U}(x,y,t)=\int\limits_{x_s}\int\limits_{y_s}\int\limits_{z_s}\frac{\mathrm{S}\left[\mathbf{r}_s,t-\dfrac{r}{c}\right]}{r}d\mathbf{r}_s, \qquad (2.10)$$

В выражении (2.10) не учитываются постоянные множители.

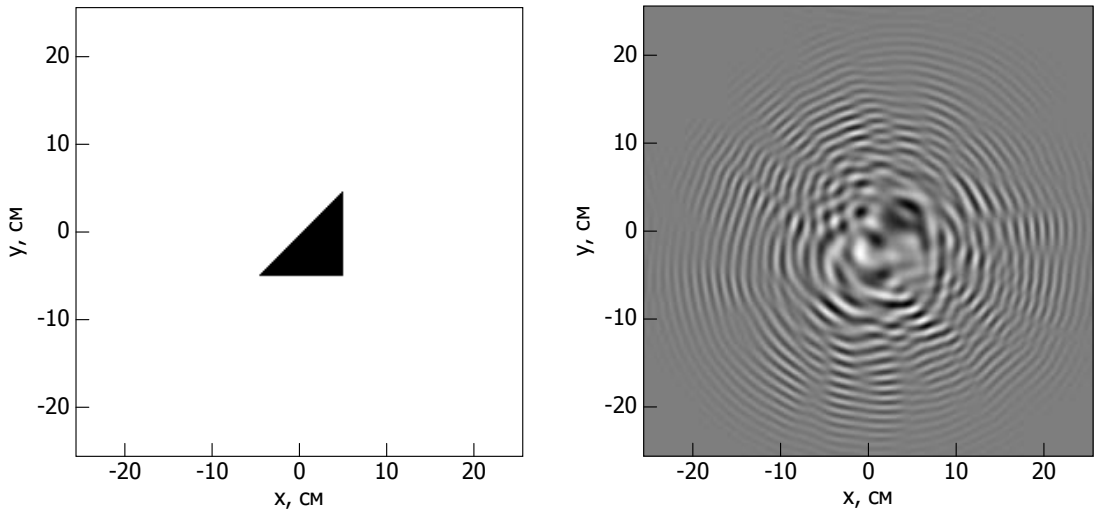
На основе обработки многомерного сигнала $\mathrm{U}(x,y,t)$ необходимо восстановить изображение звукоизлучающего объекта. В общем случае, различные точки объекта излучают различные сигналы, более того форма сигнала априорно не известна. Введём некоторые допущения. Будем считать, что объект плоский и

расположен параллельно области измерений. Тогда запишем спектр сигнала в области измерений через интеграл Релея [13] с точностью до постоянных множителей:

$$\tilde{U}(x,y,\omega)=\int_{x_s}\int_{y_s}\tilde{S}[x_s,y_s,\omega]\frac{\exp[ikr]}{r}dx_s dy_s\,, \tag{2.11}$$

где $\tilde{S}[x_s,y_s,\omega]$ - спектр сигнала в точке $(x_s,y_s,z_s=const)$ излучателя, $k=\omega/c$ - волновое число, $r=\sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2+(z-z_s)^2}$, $(z-z_s)=const=h$.

Согласно выражению (2.11) было проведено численное моделирование поля источника формы изображённой на рисунке 2.8 а. В численной модели предполагалась частота излучения 40 кГц. Также предполагалось, что фаза излучения в каждой точке различна и хаотично равномерно распределена от $-\pi$ до $+\pi$. Результат численного моделирования поля на расстоянии 15 см от излучателя представлен на рисунке 2.8 б.



а б

Рисунок 2.8 – Изображение тестового объекта и результат решения прямой задачи на частоте 40 кГц (а – изображение моделируемого звукоизлучающего объекта, б – поле на расстоянии 15 см от звукоизлучающего объекта)

2.2.3 Метод амплитудной широкополосной пространственно - согласованной фильтрации

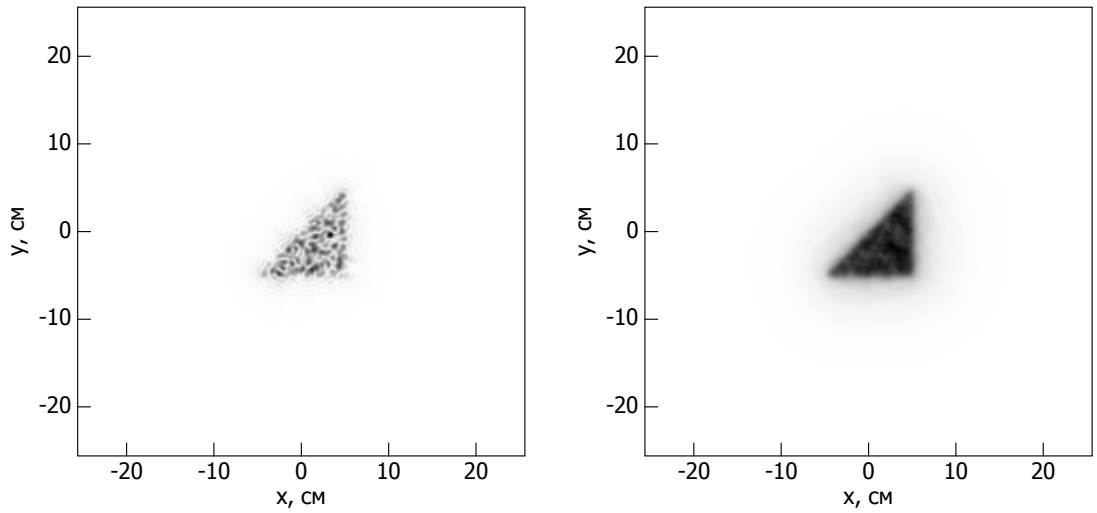
Решение обратной задачи – это восстановление изображения звукоизлучающего объекта при обработке многомерного сигнала $\mathrm{U}(x, y, t)$. Под изображением звукоизлучающего объекта подразумевается двумерная пространственная функция $\mathrm{P}(x_s, y_s)$ уровни которой показывают наличие или отсутствие объекта в точке пространства (x_s, y_s) рассматриваемой плоскости z_s. То есть, чем больше значения функции тем вероятнее наличие объекта в рассматриваемой точке. В данном случае нельзя точно определить наличие или отсутствие звукоизлучающего объекта, поскольку объект не гарантировано излучает звук в направлении измерительной системы или в диапазоне частот измерения. Колебания объекта на одной частоте, как правило, имеют характер стоячей волны, и, следовательно, имеются области узлов и пучностей. В области узлов колебания минимальны и не передаются в воздушную среду. Эти области не могут быть визуализированы. Однако на других частотах области узлов и пучностей смещаются, что должно позволить визуализировать объект при использовании множества частот. Для восстановления изображения объекта на одной частоте предлагается использовать метод пространственно - согласованной фильтрации [2,20,21]:

$$\tilde{\mathrm{P}}(x_s, y_s, \omega) = \int_x \int_y \tilde{\mathrm{U}}(x, y, \omega) \frac{\exp[-ikr]}{r} dxdy, \qquad (2.12)$$

где интегрирование ведётся по области измерений поля. Результат восстановления изображения на частоте 40кГц представлен на рисунке 2.9 а. Можно видеть, что на изображении объекта имеются минимумы и максимумы - это связано с хаотичностью фазы колебаний объекта в пространстве. Выражение (2.12) может быть применено для различных частот и на каждой частоте будет получено изображение объекта. Необходимо объединить эти изображения таким образом, чтобы визуализировать объект без интерференционных минимумов и максимумов. Предлагается суммировать амплитуды изображений на различных частотах без учёта фазы:

$$\mathrm{P}(x_s, y_s) = \sum_n \left| \tilde{\mathrm{P}}(x_s, y_s, \omega_n) \right|, \tag{2.13}$$

где ω_n - n-тая частота на которой производилось измерение поля. Суммирование по амплитуде позволяет избежать необходимости синхронизовать фазу колебаний на различных частотах к общей точке отчёта времени, а также позволяет повысить однозначность изображения объекта. Было проведено численное моделирование хаотических колебаний объекта на 64 частотах в диапазоне 10 - 40 кГц. Результат применения формулы (2.13) представлен на рисунке 2.9 б.



а б

Рисунок 2.9 – Результат восстановления изображения объекта (а – восстановление изображения излучателя на частоте 40 кГц, б – восстановление изображения излучателя в полосе частот 10-40 кГц на 64 частотах)

2.3 Определение дальности до излучающего объекта

Под изображением звукоизлучающего объекта подразумевается двумерная пространственная функция, $\mathrm{P}(x_s, y_s)$ уровни которой показывают наличие или отсутствие объекта в точке пространства (x_s, y_s) рассматриваемой плоскости z_s. То есть, чем больше значения функции, тем вероятнее наличие объекта в рассматриваемой точке. В данном случае нельзя точно определить наличие или отсутствие звукоизлучающего объекта, поскольку объект не гарантировано излучает звук в направлении измерительной системы или в диапазоне частот измерения. Колебания объекта на одной частоте, как правило, имеют характер

стоячей волны, и, следовательно, имеются области узлов и пучностей. В области узлов колебания минимальны и не передаются в воздушную среду. Эти области не могут быть визуализированы. Однако на других частотах области узлов и пучностей смещаются, что должно позволить визуализировать объект при использовании множества частот. Для восстановления изображения объекта на одной частоте предлагается использовать метод пространственно - согласованной фильтрации [3]:

$$\tilde{\mathrm{P}}(x_s, y_s, \omega) = \int_x \int_y \tilde{\mathrm{U}}(x, y, \omega) \frac{\exp[-ikr]}{r} dxdy, \qquad (2.14)$$

где интегрирование ведётся по области измерений поля.

Формула (2.13) позволяет получить разрешение в плоскости сканирования при известной дальности до объекта. Можно, ли определить дальность до объекта по многопозиционным сверхширокополосным измерениям при отсутствии синхронизации между излучателем и приёмником. Если бы присутствовала синхронизация, то расстояние определялось бы просто по задержке распространения волны в воздухе, при известной скорости звука легко определяется дальность. Однако в данной схеме измерений не предполагается наличие синхронизации с источником сигнала. Сделаем допущения относительно формы объекта, будем считать, что он плоский и параллелен плоскости измерений. Для определения расстояния до объекта, предполагается использовать то свойство восстанавливаемых изображений, что при фокусировки на дальность, отличающуюся от расстоянии до объекта. Изображения объекта размывается, то есть его пространственный спектр сужается. Таким образом, расстояние до объекта можно определить перебором расстояний фокусировки, то расстояние, при котором пространственный спектр будет самым широким, и будет являться расстоянием до объекта.

В качестве оценки ширины пространственного спектра предлагается выбрать величину:

$$\mathrm{S} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \tilde{\mathrm{P}}(k_x, k_y) \right| dk_x dk_y}{\max\left(\left| \tilde{\mathrm{P}}(k_x, k_y) \right| \right)}, \qquad (2.15)$$

где $\tilde{P}(k_x, k_y)$ - пространственный спектр восстановленного изображения объекта, $\max\left(\left|\tilde{P}(k_x, k_y)\right|\right)$ - максимум модуля пространственного спектра.

Согласно формуле (2.15) была рассчитана зависимость ширины пространственного спектра от дальности фокусировки. Результаты расчётов представлены на рисунке 2.10. Можно видеть отчётливый единственный максимум на дальности 15 см, которая соответствует дальности до объекта.

Численный эксперимент показывает возможность визуализации звукоизлучающего объекта в широкой полосе частот и возможность определения дальности до объекта. Заметим, что дальность до объекта будет возможно определить предложенным методом, только до дальностей порядка размеров апертуры системы, поскольку на больших расстояниях разрешение системы ухудшается и даже при фокусировке на правильную дальность пространственный спектр восстановленных изображений будет узким.

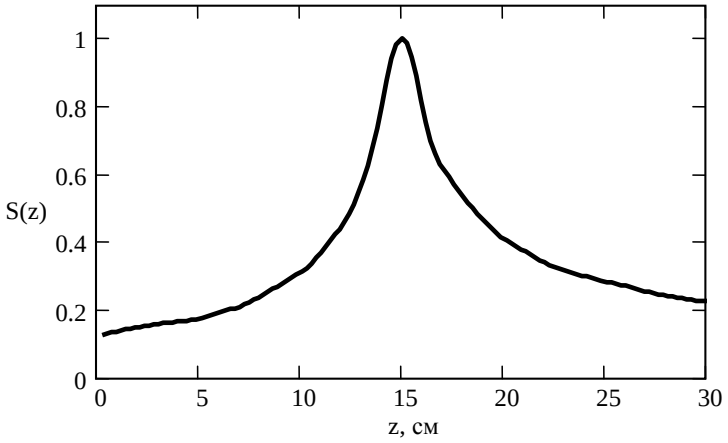


Рисунок 2.10 – Зависимость ширины пространственного спектра от дальности фокусировки

2.4 Определение направления на источник излучения

Будем считать, что сторонний источник излучает сигнал широкого спектра. Приёмная линейная решётка микрофонов позволяет измерять одновременно сигнал с частотой в десятки кГц (рисунок 2.11). Сигнал с каждого микрофона оцифровывается синхронно [22].

Рисунок 2.11 – Схема измерений источника звука с линейной решёткой микрофонов

Поскольку сигналы оцифрованы одновременно, они имеют пространственную когерентность. Обозначим оцифрованные сигналы функцией $S(x,t)$, где x – координата микрофона, t – время. Для определения направления на источник излучения перейдём в частотную область. Возьмём преобразование Фурье по времени от всех измеренных сигналов и получим их спектр, которого обозначим функцией $U(x,\omega)$, где ω – частота. Поскольку сигнал источника априорно неизвестен, то отсчёт фазы предлагается вести относительно центрального микрофона в решётке, то есть от $U(0,\omega)$.

Если источник излучения находится на расстояниях много больше размеров апертуры, то его поле будет иметь вид плоской волны. Определить направление прихода полоской волны можно с помощью перехода в спектр плоских волн:

$$\tilde{U}(k_x,\omega)=\int_{-B/2}^{B/2}U(x,\omega)e^{-ik_x x}dx, \tag{2.16}$$

где k_x – пространственная частота для оси x, B – размер апертуры решётки.

Если на решётку падает плоская волна вида $V(x,\omega)=e^{ik'_x x+ik'_z z}$ (где положим $z=0$), то спектр плоских волн выражается так:

$$\tilde{U}(k_x,\omega)=\int_{-B/2}^{B/2}e^{ik'_x x}e^{-ik_x x}dx=2\frac{\sin\left(\frac{B}{2}\left[k'_x-k_x\right]\right)}{\left[k'_x-k_x\right]}. \tag{2.17}$$

То есть спектр плоских волн имеет максимум при $k'_x=k_x$. Зная волновое число($k=\omega/c$) для рассматриваемой частоты можно вычислить угол прихода волны по формуле:

$$\sin\alpha = k_x / k\,. \qquad (2.18)$$

В численной модели рассматривали несколько случаем размещения модулей из 8 микрофонов. Первый случай приёмная решётка составленная из 8 модулей по 8 микрофонов размерами 8 см. Разместим модули так, чтобы апертура решётки составила 64 см. (рисунок 2.12).

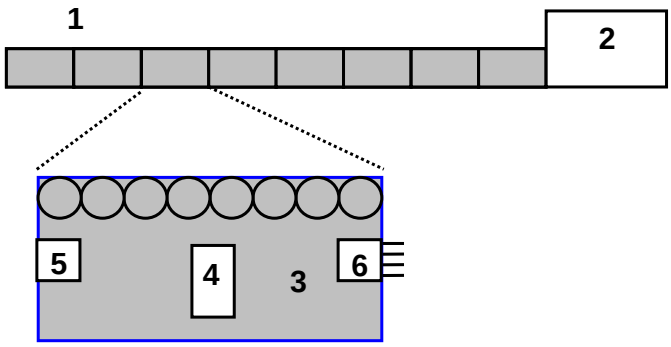


Рисунок 2.12 – Схема линейной матрицы (1 - матрица микрофонов, 2 - микроконтроллер STM32F407, 3 - модуль из 8 микрофонов, 4 - мультиплексор, 5,6 - разъемы для соединения модулей).

Было проведено численное моделирование диаграммы направленности на источник расположенного под углом 5,7 градусов на дальности 10 м. На рисунке 2.13 представлен расчёт диаграммы направленности решётки на частотах 500 Гц и 1000 Гц.

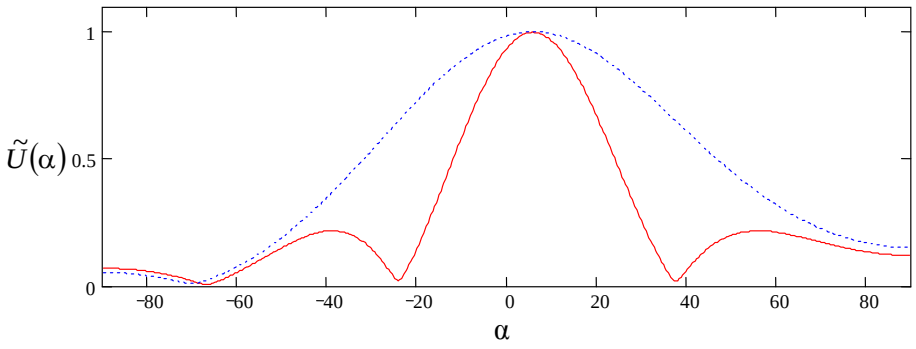


Рисунок 2.13 – Диаграмма направленности заполненной решётки размерами 64 см на частоте 500Гц (пунктирный) и 1000 Гц (сплошной).

Ширина диаграммы по локальному минимуму вокруг центрального лепестка на 1000 Гц составила 24,6 градуса, а на частоте 500 Гц составила 51,7 градуса. Как можно видеть диаграмма направленности достаточно широкая, 72 градуса на

1000 Гц (по нулям основного лепестка). Для повышения точности определения направления на излучатель необходимо её сузить. Это возможно за счёт увеличения апертуры системы.

Другой случай когда приёмную решётку составленную из модулей по 8 микрофонов размерами 8 см, разместили модули с шагом 20 см , так, чтобы апертура решётки составила 148 см. (рисунок 2.14).

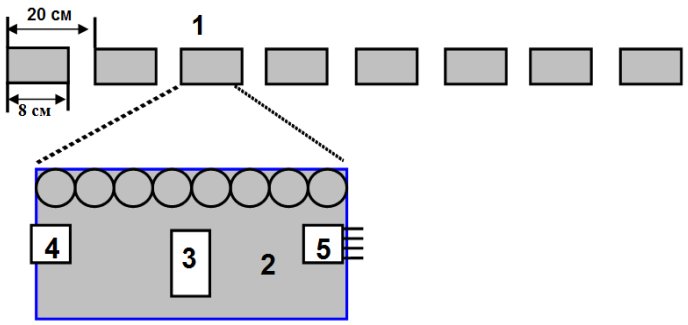


Рисунок 2.14 – Схема линейной матрицы (1 - матрица микрофонов, 2 - модуль из 8 микрофонов, 3 - мультиплексор, 4,5- разъемы для соединения модулей).

Модули можно разносить на различные расстояния, увеличивая апертуру решётки. Однако при слишком большом расстоянии будут появляться артефакты. На рисунке 2.15 представлен расчёт диаграммы направленности решётки на частотах 500 Гц и 1000 Гц.

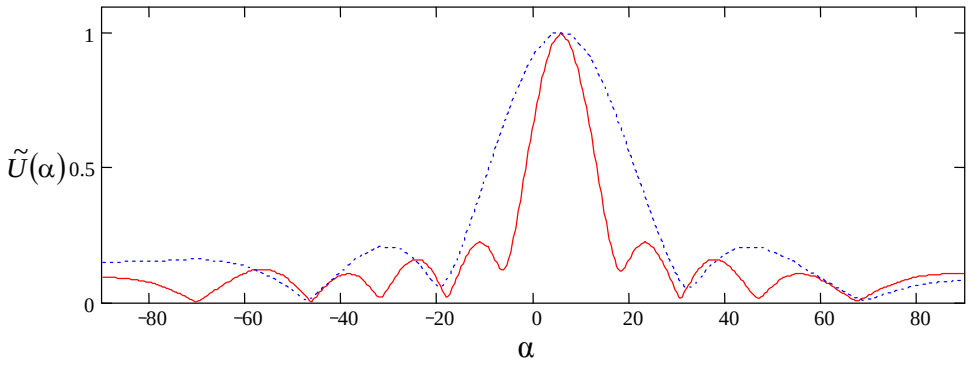


Рисунок 2.15 – Диаграмма направленности разреженной решётки размерами 148 см на частоте 500Гц (пунктирный) и 1000 Гц (сплошной).

Ширина диаграммы по локальному минимуму вокруг центрального лепестка на от 500 до 1000 Гц составила 36,6 градусов, и на 1000 Гц появились боковые лепестки.

Рассмотрели третий случай когда приёмную решётку составленную из модулей по 8 микрофонов размерами 8 см, модули разместили с шагом 32 см, так, чтобы апертура решётки составила 285см. (рисунок 2.16).

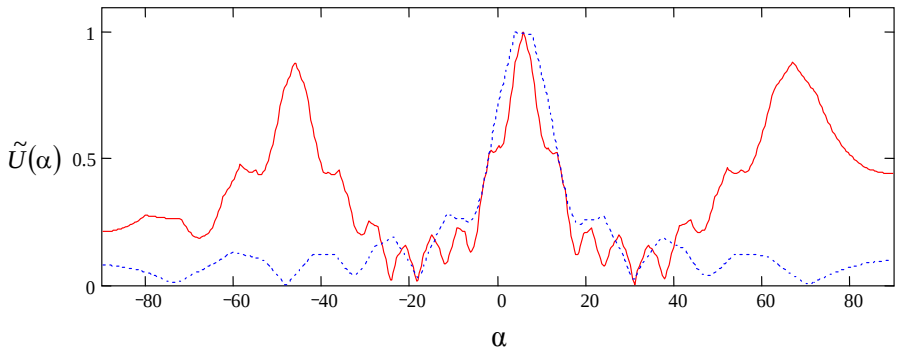


Рисунок 2.16 – Диаграмма направленности разреженной решётки размерами 285 см на частоте 500Гц (пунктирный) и 1000 Гц (сплошной).

Увеличение апертуры приводит к сужению основного максимума, поскольку рассматривается точечный источник сферических волн, а спектр плоских волн позволяет определять направление только плоской волны. Иными словами, на краях большой апертуры отличие сферической волны от плоской становится существенным, и дальнейшее увеличение апертуры приводит только к нарастанию артефактов.

Для более точного восстановления положения источника при больших апертурах системы необходимо осуществлять полное восстановление поля методом пространственно – согласованной фильтрации, который заключается в следующем. Домножим пространственный спектр поля в области измерений на множитель вида $\left(e^{ik_z z}\right)^*$:

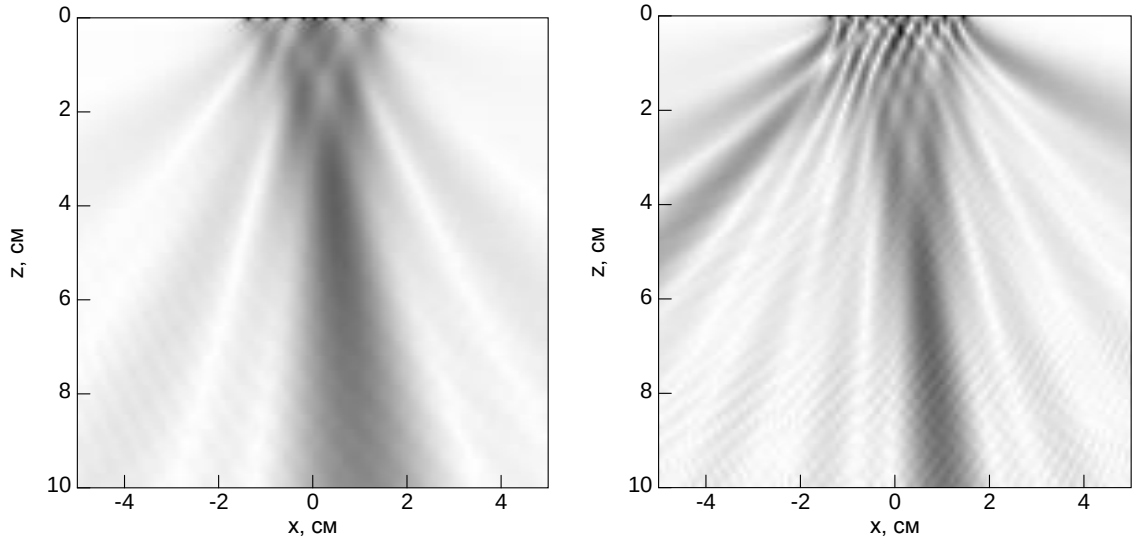
$$\tilde{U}(k_x, z, \omega) = \tilde{U}(k_x, 0, \omega)\left(e^{ik_z|z|}\right)^*, \qquad (2.19)$$

где $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2}$.

Далее восстанавливаем само распределение поля через преобразование Фурье по пространственной частоте k_x:

$$U(x,z,\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{U}(k_x,z,\omega)e^{ik_x x}dk_x \qquad (2.20)$$

На рисунке 2.17 показано восстановленное поле источника на частотах 500Гц и 1000Гц.



а б

Рисунок 2.17 – Восстановленное поле источника (а – 500 Гц, б – 1000 Гц)

Восстановление поля позволяет наиболее точно локализовать источник с наилучшим разрешением.

2.5 Приёмная решётка микрофонов с параллельной оцифровкой

Одной из проблем восстановления изображений сторонних источников звука является отсутствие синхронизации источника звука и приёмной системы. В таком случае, целесообразно вести отсчёт фазы сигналов от одного из элементов приёмной решётки. Было проведено численное моделирование приёмной линейной решётки [19] микрофонов из 16 элементов с шагом размещения $d=6\,\text{см}$ в полосе частот от 1000 до 1300 Гц (рисунок 2.18).

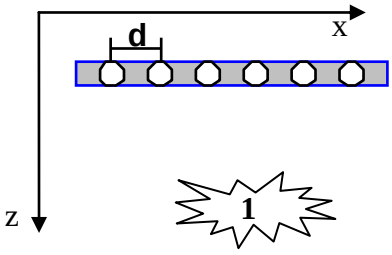


Рисунок 2.18 – Схема измерений (1 – источник звука)

В качестве звукоизлучающего объектов рассматривался одиночный точечный источник на дальности 40 см. Результат восстановления изображения излучателя представлен на рисунке 2.19.

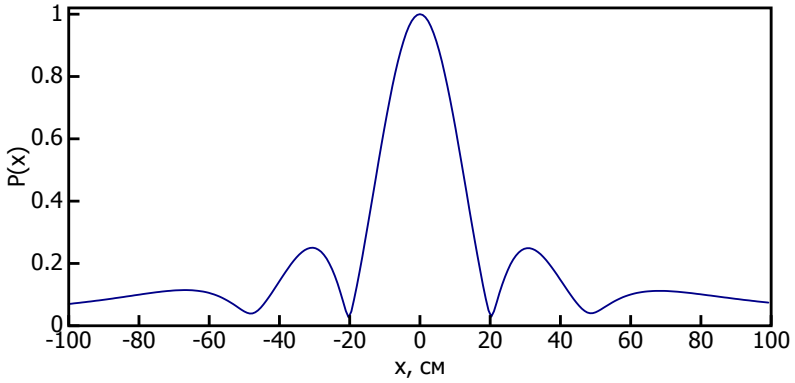


Рисунок 2.19 – Восстановленное изображение точечного источника на дальности 40 см

Согласно формуле (2.20) было восстановлено изображение источника на частоте 1000 Гц. На рисунке 2.20 показано восстановленное поле источника на частоте 1000 Гц на разных дальностях. Видно, что максимум поля находится на дальности 40 см до объекта.

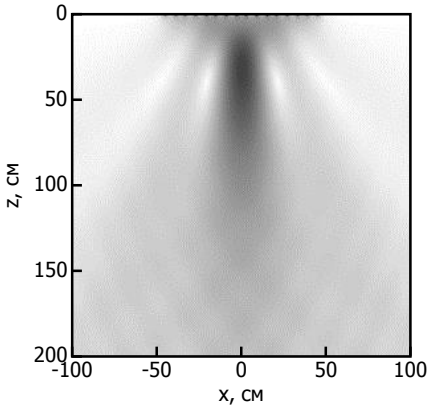
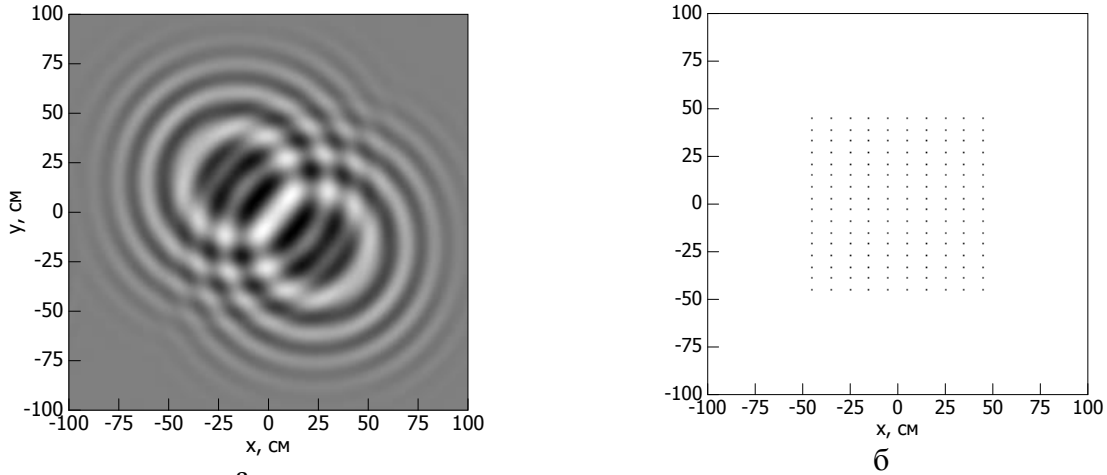


Рисунок 2.20 – Восстановленное поле источника на частоте 1000 Гц на разных дальностях

2.6 Численное моделирование двумерной решётки

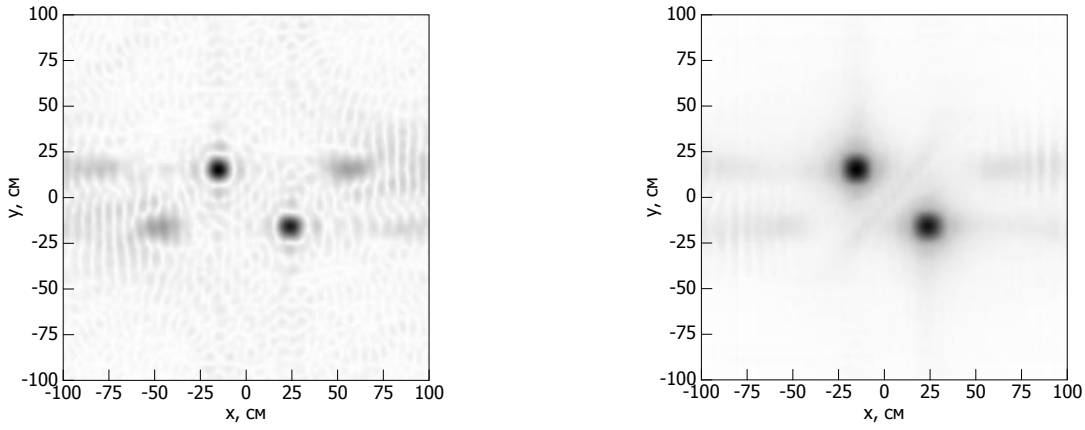
В численной модели рассматривалось два точечных излучателя на дальности 60 см от плоскости измерений. Излучение производилось в полосе частот от 500 до 3500 Гц, случайным сигналом. Два излучателя не синхронизированы и излучают разные сигналы. На рисунке 2.21 а представлен результат моделирования поля двух источников на частоте 3500 Гц, на рисунке 2.21б размещение микрофонов в решётке.



а б

Рисунок 2.21 – Результат численного моделирования двух источников на частоте 3500 Гц (а – поле источников, б – размещение микрофонов в решётке)

После обработки методом некогерентной широкополосной пространственно - согласованной фильтрации было восстановлено изображение двух источников, которые представлены на рисунке 2.22.



а б

Рисунок 2.22 – Восстановление изображение источников (а – на частоте 3500 Гц, б- в полосе частот 500-3500 Гц)

Результаты численного моделирования подтверждают применимость метода некогерентной широкополосной пространственно - согласованной фильтрации.

Также была рассчитана в численной модели ширина пространственной локализации изображения по дальности (ΔZ), которая представлена на рисунке 2.23. В численной модели рассматривали один источник звука на расстоянии 50см от решётки микрофонов. Можно видеть, что локализация изображения сосредоточена около дальности 50см на интервале 30см.

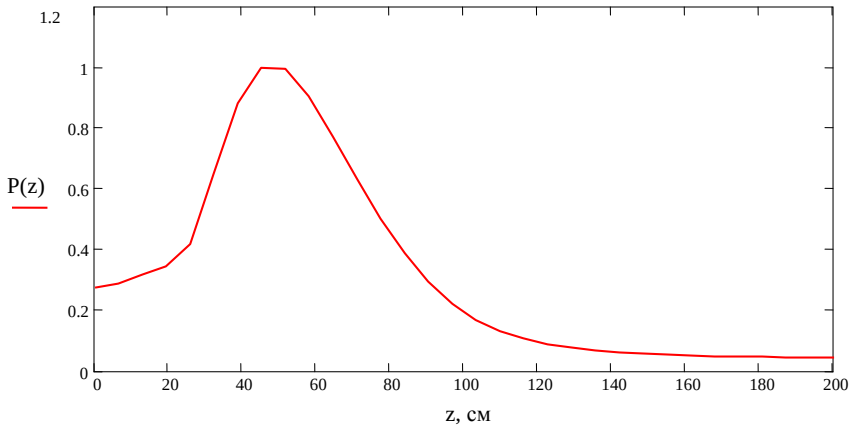


Рисунок 2.23 – Локализация восстановленного изображения по дальности (полоса частот от 1860 Гц до 3600 Гц)

Аналогичное численное моделирование было произведено для одиночного источника с вдвое меньшей шириной полосы частот и с сохранением дальности до объекта 50см показано на рисунке 2.24.

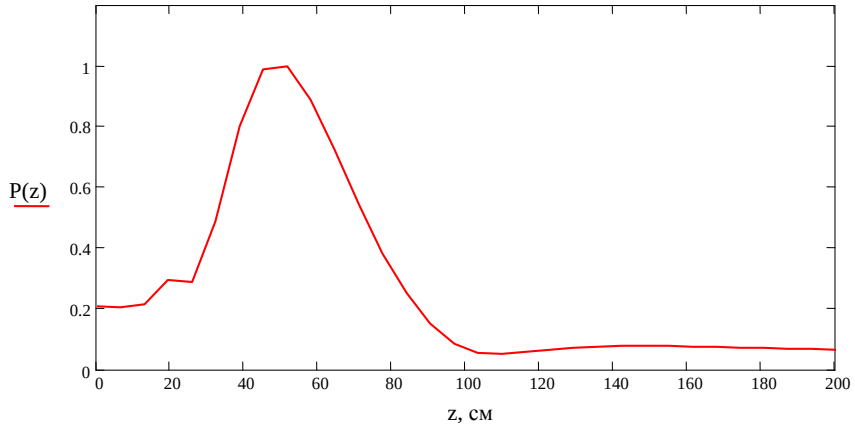


Рисунок 2.24 – Локализация восстановленного изображения по дальности (полоса частот от 2730 Гц до 3600 Гц)

Можно наблюдать, что ΔZ не изменилась. Следовательно, локализация изображения по дальности не зависит от ширины полосы частот. Для подтверждения независимости от полосы частот локализации изображения по дальности провели численное моделирование на одной частоте представлено на рисунке 2.25.

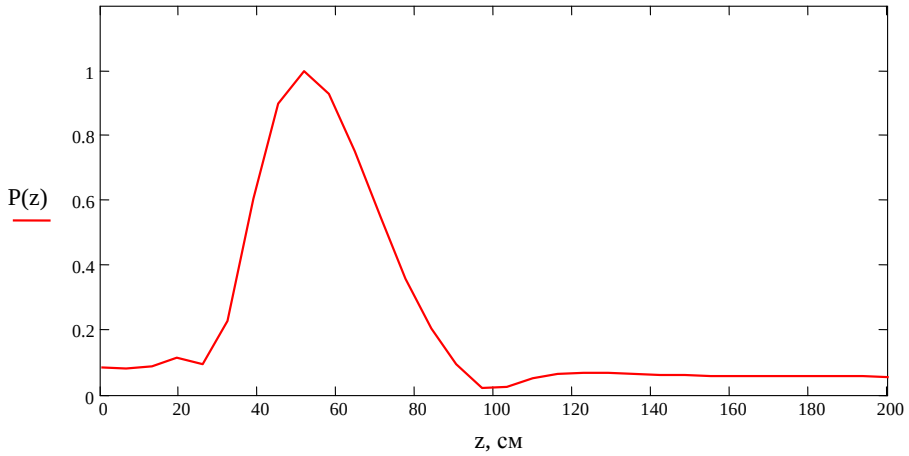


Рисунок 2.25 – Локализация восстановленного изображения по дальности на одной частоте 3600 Гц

Отсюда видно, что локализация изображения по дальности не изменилась, а значит определяется верхней частотой в спектре сигнала источника.

Предполагаем, что размер апертуры также будет влиять на ΔZ. В связи с этим, было промоделировано двумерная решётка с размерами апертуры 186 см на 186 см с шагом элементов 6 см (рисунок 2.26).

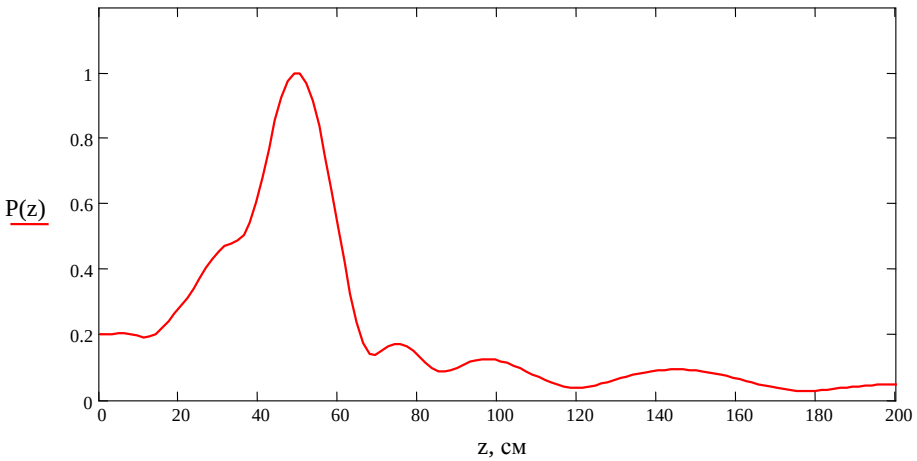


Рисунок 2.26 – Локализация восстановленного изображения по дальности на одной частоте 3600 Гц при увеличенном размере апертуры до 186 см

По результатам моделирования (рисунок 2.23) становится, очевидно, что ΔZ уменьшилась с увеличением апертуры.

2.7 Аналитическая оценка локализации изображения по дальности

Схема измерений представлена на рисунке 2.27. Предполагается, что область измерения звукового поля находится на некотором расстоянии h от точечного источника.

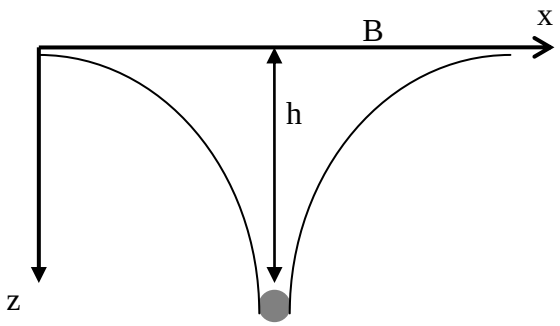


Рисунок 2.27 –Схема измерений

Запишем поля монохроматического источника в следующем виде:

$$\mathrm{U}(x) = \frac{e^{ik\sqrt{x^2+h^2}}}{\sqrt{x^2+h^2}}. \qquad (2.2)$$

Восстановление изображения методом пространственно – согласованной фильтрации описывается следующим выражением:

$$\mathrm{P}(z) = \int_{-B/2}^{B/2} \frac{e^{ik\sqrt{x^2+h^2}}}{\sqrt{x^2+h^2}} \frac{e^{-ik\sqrt{x^2+z^2}}}{\sqrt{x^2+z^2}} dx. \qquad (2.3)$$

Для вычисления интеграла (2.3) примем ряд приближений:

$\sqrt{x^2+h^2} \approx h\left(1+\frac{1}{2}\frac{x^2}{h^2}\right)$ – разложение в ряд Тейлора в приближении $h >> x$;

$\sqrt{x^2+z^2} = z\left(1+\frac{1}{2}\frac{x^2}{z^2}\right)$ – разложение в ряд Тейлора в приближении $z >> x$.

С учетом допущенный приближений выражение (2.3) принимает вид:

$$\mathrm{P}(z)=\frac{1}{hz}e^{ik(h-z)}\int_{-B/2}^{B/2}e^{ik\frac{x^2}{2}\left(\frac{1}{h}-\frac{1}{z}\right)}dx, \qquad (2.4)$$

где B - размер апертуры приемной решётки.

Введем обозначение интеграла Френеля в виде:

$$F(a)=\int_{-1}^{1}e^{iq^2a}dq \qquad (2.5)$$

где a – безразмерный коэффициент

График функции $F(a)$ изображен на рисунке 2.28. Область локализации по дальности будем определять по уровню 0,7 от максимума функции $F(a)$.

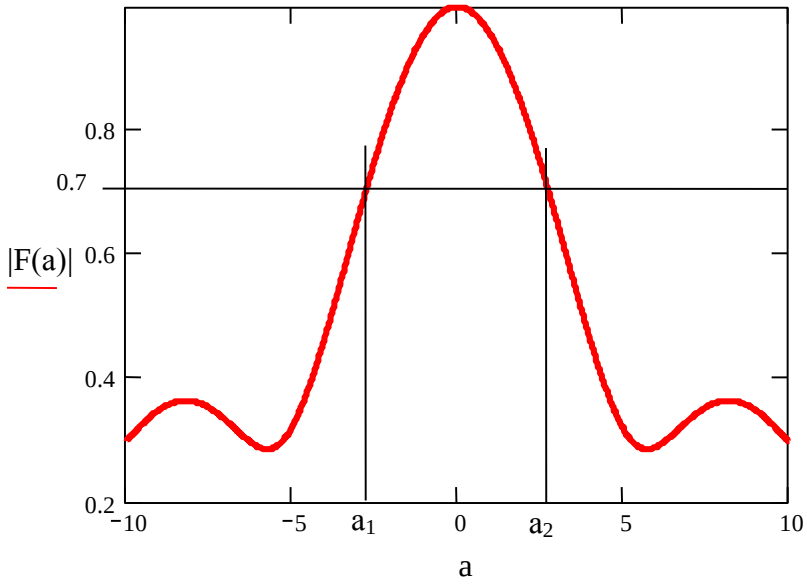


Рисунок 2.28 –График функции $F(a)$

Данный уровень соответствует значениям $a_1=-2.7$, $a_2=-2.7$.

Введем замену переменных $q=\frac{x}{B/2}$, $a=\frac{k}{2}\left(\frac{B}{2}\right)^2\left(\frac{1}{h}-\frac{1}{z}\right)$, $dq=\frac{dx}{(B/2)}$.

Следовательно, выражение (2.4) примет вид:

$$\mathrm{P}(z)=\frac{e^{ik(h-z)}}{hz}\frac{B}{2}F(a) \qquad (2.6)$$

Оценим область локализации по формуле:

$$\Delta z=z_2-z_1=\frac{hkB^2}{kB^2-8ha_2}-\frac{hkB^2}{kB^2-8ha_1}, \qquad (2.7)$$

где $z_1 = \dfrac{1}{\dfrac{1}{h} - \dfrac{8a_1}{kB^2}}$, $z_2 = \dfrac{1}{\dfrac{1}{h} - \dfrac{8a_2}{kB^2}}$. Учтём, что $a_1 = -a_2$, тогда $\Delta z = \dfrac{16kh^2B^2a_2}{k^2B^4 - (8ha_2)^2}$.

График функции $P(z)$ представлен на рисунке 2.29.

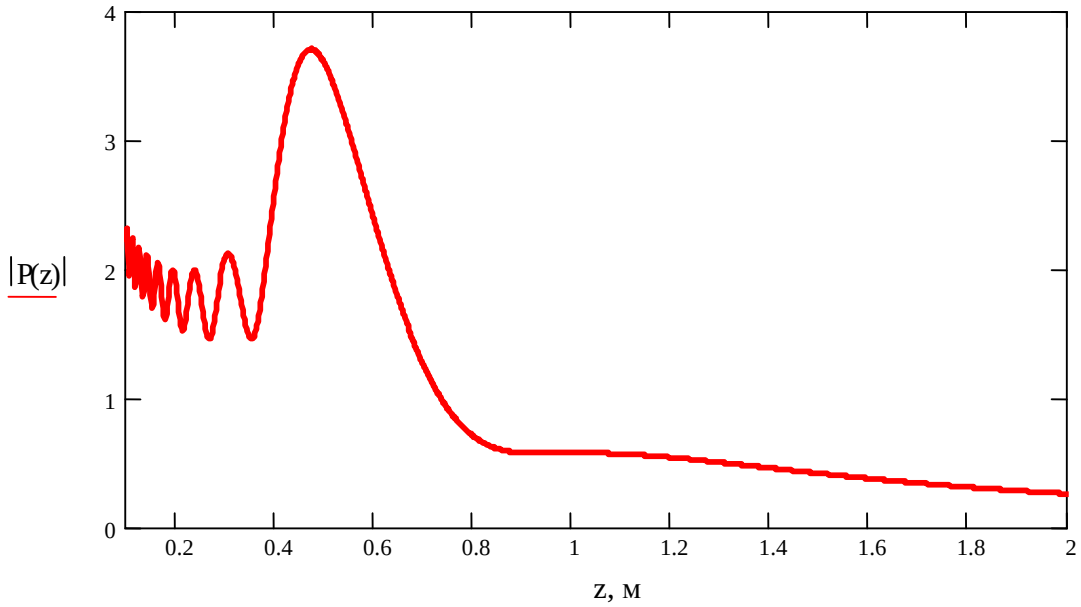


Рисунок 2.29 –Восстановленное изображение по дальности для точечного источника $P(z)$

Как можно видеть он согласуется с результатом численного моделирования (рисунок 2.25). Однако, можно видеть отличие связано с тем что, в численном моделировании рассматривалась двумерная решётка, а в аналитическом рассмотрении одномерная решётка. В отличие от локационного сверхширокополосного зондирования [23], где разрешение по дальности определяется исключительно шириной полосы частот, в случае обнаружения сторонних широкополосных источников звука, такой зависимости нет.

3 Экспериментальные исследования

3.1 Описание двумерной решётки микрофонов

Для проведения экспериментальных исследований была разработана двумерная решётка из 160 микрофонов позволяющая одновременно производить оцифровку сигналов (рисунок 3.1). Двумерная решётка микрофонов содержит 10 линейных решёток микрофонов размещённых с шагом 10 см, STM32F407 микроконтроллер.

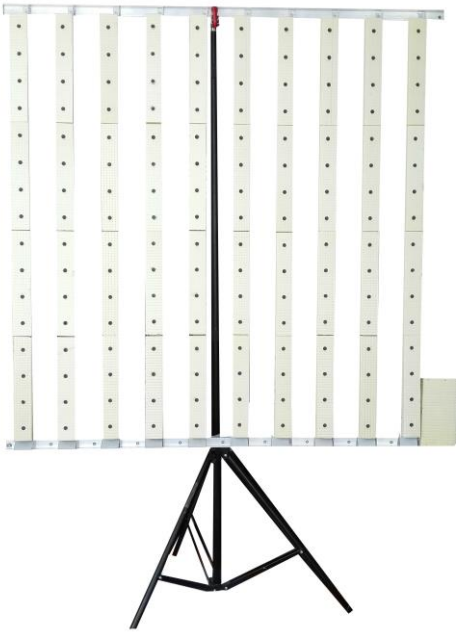


Рисунок 3.1 – Фотография двумерной решётки

Каждая линейная решётка содержит по 16 электретных микрофонов подключенных к отдельному блоку, который содержит в себе 16-ти канальный мультиплексор и усилитель. (рисунок 3.2)

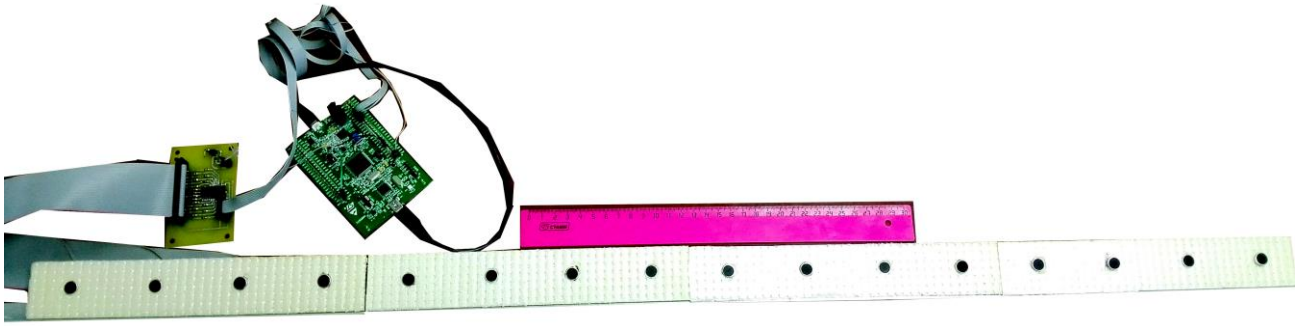


Рисунок 3.2 – Фотография линейной решётки

Линейная решётка, подключена к своему блоку мультиплексирования и усиления, который показан на рисунке 3.3.

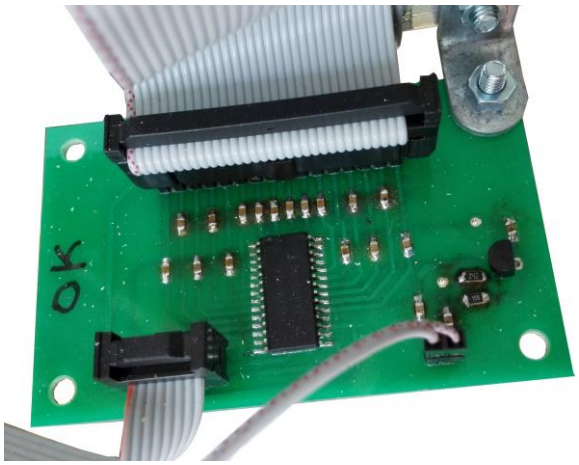


Рисунок 3.3 – Фотография блока мультиплексирования и усиления

На каждый электретный микрофон подается смещающее напряжение через отдельный резистор. Выход отдельного микрофона подключен через конденсатор к мультиплексору. Мультиплексор подключен к микроконтроллеру STM32F407 и управляется четырьмя бинарными выходами адресации и одним выходом включения/выключения. Выход мультиплексора подключен к микроконтроллеру, который позволяет оцифровать сигнал со всех микрофонов в линейной решетке с длительностью 8 мкс. В установке используется микроконтроллер STM32 F407 на плате ST Discovery F4. Микроконтроллер синхронизирован по времени и предает в компьютер оцифрованные сигналы с АЦП и для всех состояний мультиплексоров для отдельного момента времени одним пакетом. Длительность измерения занимает 32 мс это 128 точек, а длительность передачи данных: 52 мс, при этом частота оцифровки 7200Гц.

По запросу от компьютера микроконтроллер запускает измерения с перебором всех состояний мультиплексора 128 раз в течении 32 мс и передает пакет измеренных данных по интерфейсу USB в персональный компьютер. Процессом измерений управляет специально разработанное программное обеспечение Audio Camera, написанная Д.Я Сухановым интерфейс которой представлен на рисунке 3.4.

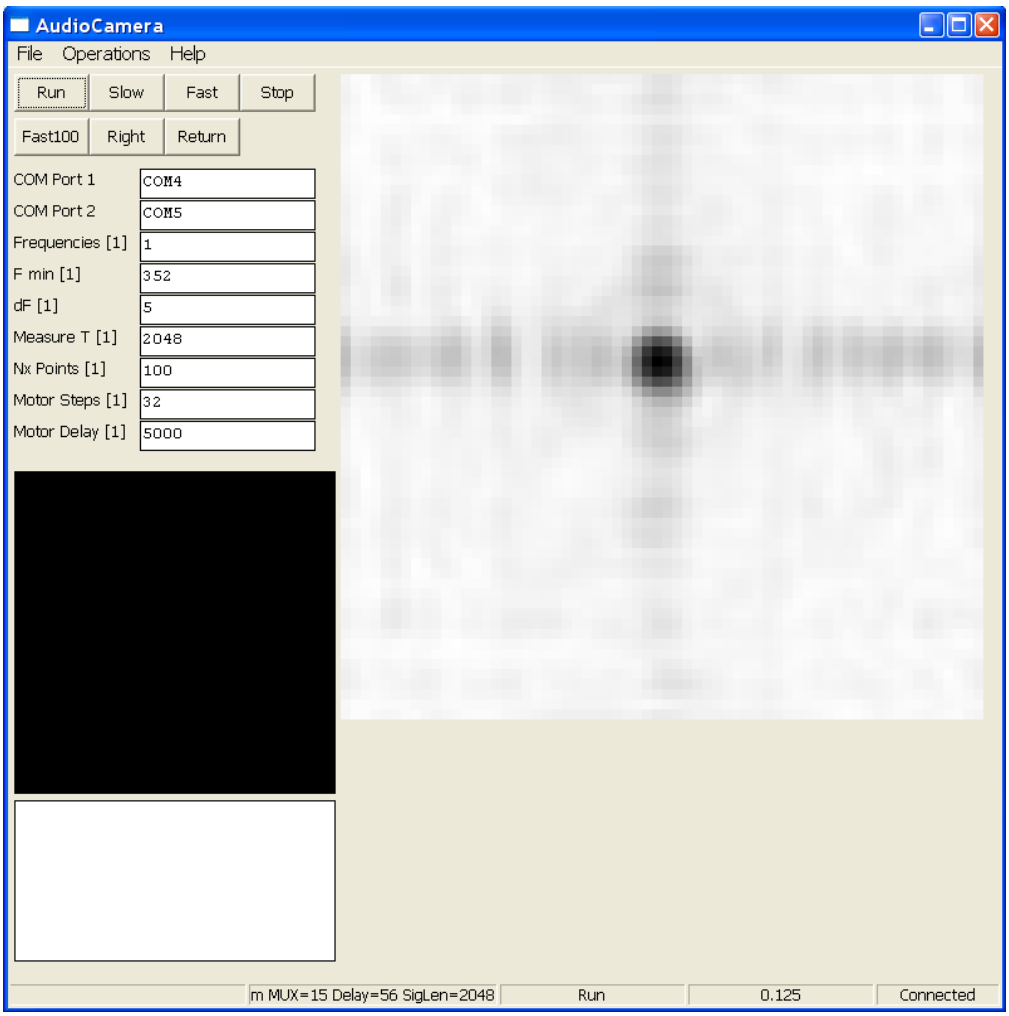


Рисунок 3.4 – Интерфейс программы AudioCamera

Программа, позволяет быстро измерить сигнал и получить изображения исследуемого объекта в режиме реального времени. В левой части рисунка 1 представлены кнопки управления и поля настройки системы, а в правой представлено изображение обработанного сигнала. На изображение белым пятном показан единственный источник звука, который в ходе эксперимента был расположен в центре двумерной решетки.

3.2 Результаты экспериментальных исследований

3.2.1 Эксперимент с параллельной оцифровкой линейной решёткой микрофонов

Были проведены экспериментальные исследования с параллельной оцифровкой одиночной решёткой микрофонов состоящей из 16 микрофонов. Разработанная экспериментальная установка изображена на рисунке 3.5.

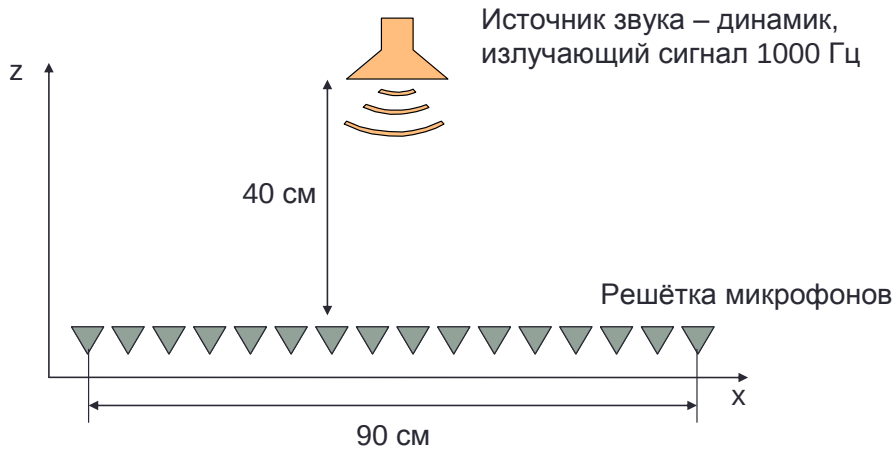


Рисунок 3.5 – Схема измерений

Линейная решётка микрофонов располагалась горизонтально, апертура решётки составляла 90 см. Микрофоны в решётке располагались с шагом 6 см. Исследуемый объект представлял собой динамик излучающий сигнал на частоте 1000 Гц и располагался на дальности 40 см от области измерений. Сигнал с динамика контролировался компьютером. Рассеянные волны с динамика падали в линейную решётку микрофонов [18] далее оцифрованные сигналы передавались на компьютер с помощью микроконтроллера.

В результате эксперимента был получен сигнал на частоте 1000 Гц с микрофона в центре решётки (рисунок 3.6).

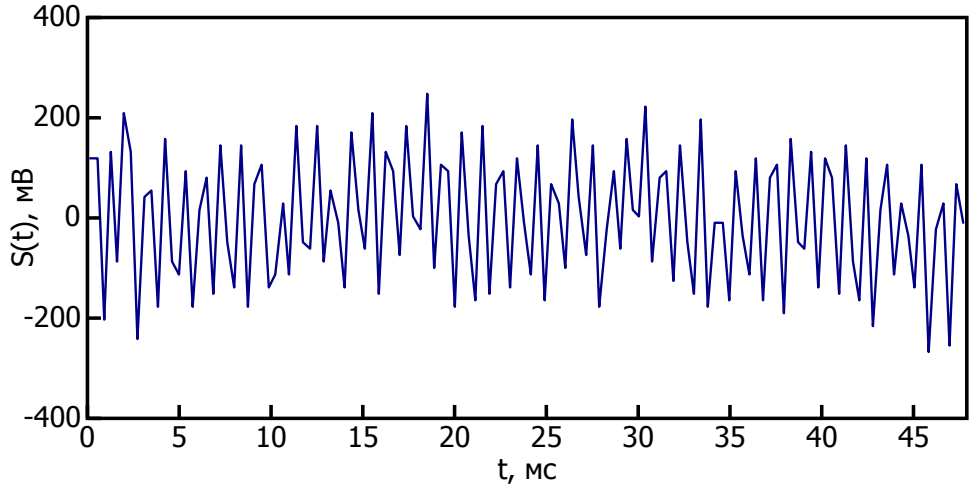


Рисунок 3.6 – Сигнал с одного микрофона на частоте 1000 Гц

В ходе эксперимента был получен сигнал на частоте 1300 Гц который представлен на рисунке 3.7. Наблюдаются биения на пределе по причине оцифровки сигнала, которая идет с частотой близко к максимальной частоте оцифровки 1330 Гц линейной решеткой микрофонов.

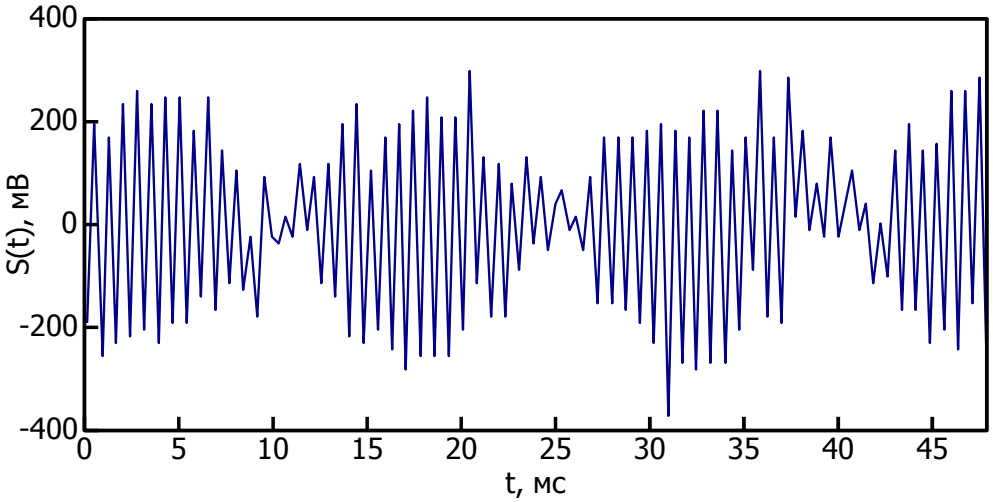


Рисунок 3.7 – Сигнал с одного микрофона на частоте 1300 Гц

У каждого выделили отдельный сигнала на частоте 1000 Гц и взяли комплексные амплитуды, потом их сфокусировали. От исходного сигнала взяли преобразование Фурье и получили спектр на частоте 1000 Гц который представлен на рисунке 3.8.

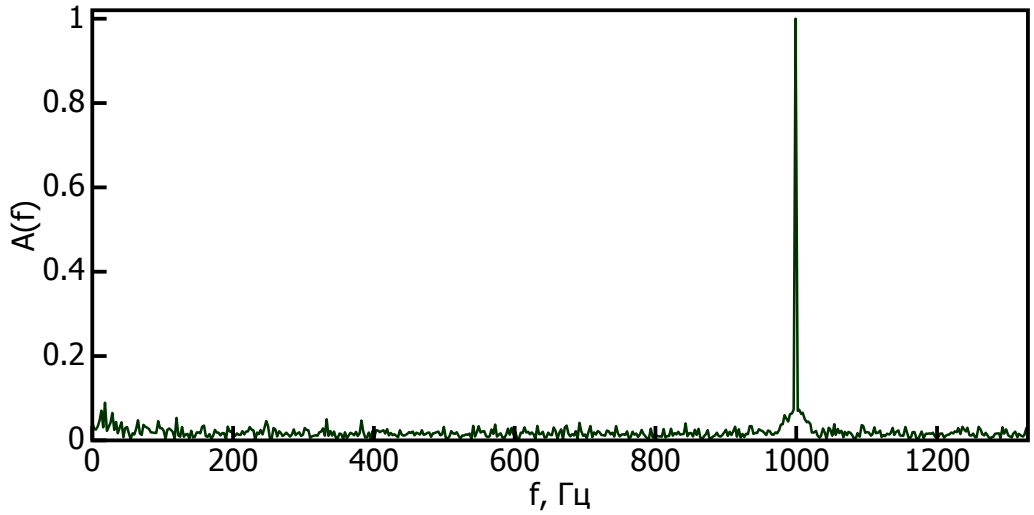


Рисунок 3.8 – Спектр сигнала на частоте 1000 Гц

Видно что уровень сигнал шум достаточно высокий. Более чем в 10 раз сигнал превышает шум.

Аналогично, проделав такую же процедуры для сигнала на частоте 1300 Гц. На рисунке 3.9 показан спектр сигнала с одного микрофона на частоте 1300 Гц.

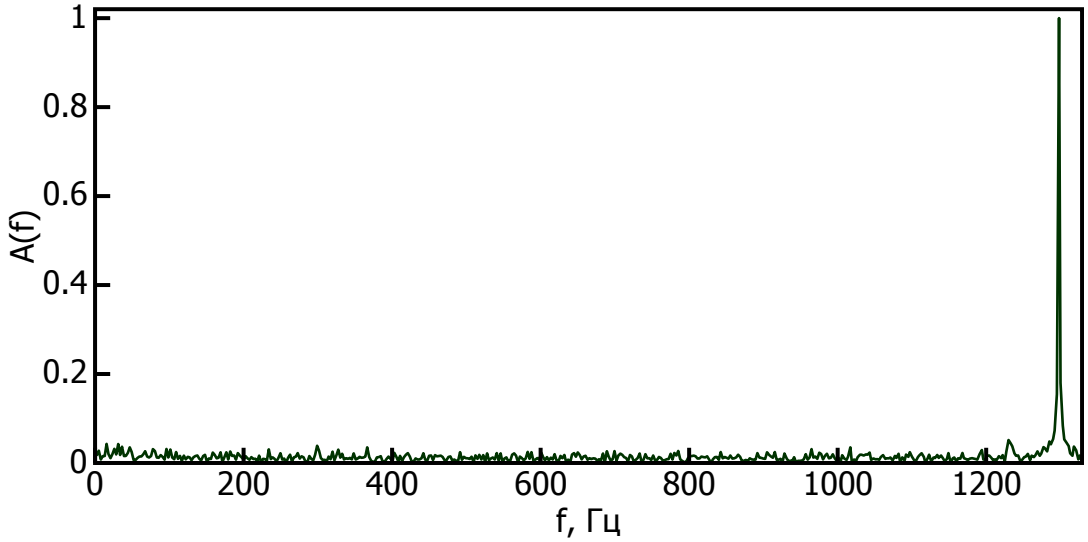


Рисунок 3.9 – Спектр сигнала на частоте 1300 Гц

Результат восстановление изображения точеного источника представлено на рисунке 3.10. Здесь, показан отдельно взятый исследуемый сигнал с одного микрофона, который расположен в центре всей линейной решётки микрофонов.

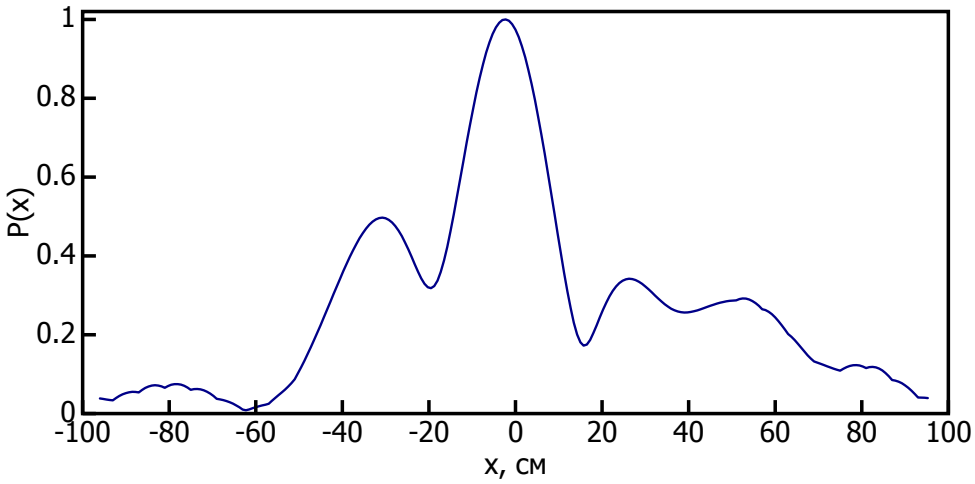


Рисунок 3.10 – Фокусировка измеренных сигналов на частоте 1000 Гц

Ширина центрального максимума в плоскости x на 1000 Гц по уровню половинной амплитуды около 23 см.

Можно наблюдать отчетливый максимум в центре, который соответствует нашему источнику звука. При этом присутствует значительный уровень боковых лепестков из за неточности экспериментальной установки.

3.2.2 Экспериментальные исследования с помощью двумерной решётки микрофонов

Для проверки предложенного метода и численного моделирования провели экспериментальные исследования с помощью разработанной двумерной решетки микрофонов состоящей из 10-ти линейных решеток (рисунок 3.11).

Данная установка позволяет одновременно оцифровывать сигналы с 160 – ти микрофонов с частотой 7200 Гц. Оцифрованные сигналы микроконтроллер передает в персональный компьютер.

Двумерная решетка микрофонов располагалась вертикально к источникам звукам на дальности 50 см, источники звука были отдалены друг от друга на расстоянии 40 см.. Источники звука представляют собой динамики, излучающие на определенной частоте сигнал, контролируемый компьютером.

а б

Рисунок 3.11 – Общий вид экспериментальной установки с двумя излучателями (а – вид сбоку, б – вид сзади)

Поскольку, нет синхронизации источника звука и приемника, мы не можем обеспечить синфазное сложение сигналов от источника на всех частотах. Поэтому предлагается суммировать модули восстановленных звуковых изображений на каждой частоте.

Таким образом, широкополосная обработка осуществляется следующим образом:

$$\mathrm{P}(x_s, y_s) = \sum_n \left| \tilde{\mathrm{P}}(x_s, y_s, \omega_n) \right| \tag{3.1}$$

В результате эксперимента был измерен шумовой сигнал, пришедший в один из микрофонов, излучённый из динамиков, задаваемый при помощи компьютера. На рисунке 3.12 изображен шумовой сигнал.

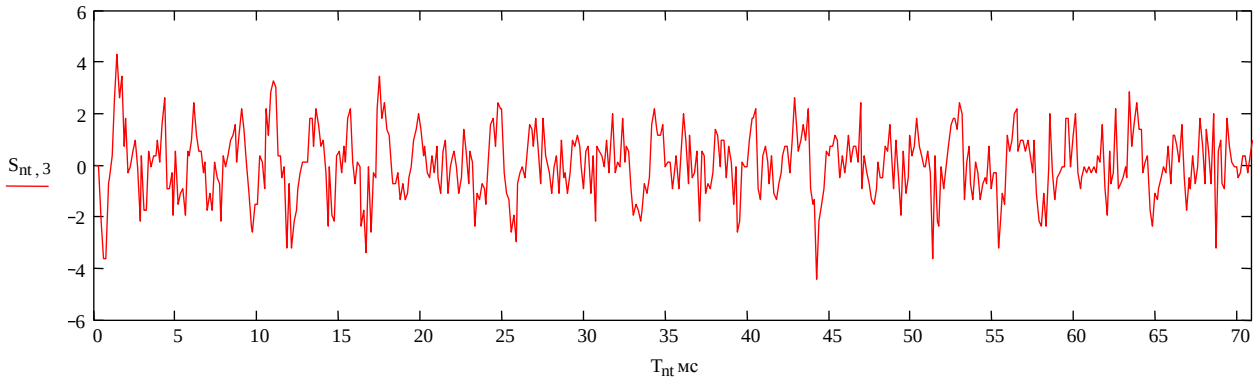


Рисунок 3.12 – Изображение шумового сигнала с двумя излучателями.

К измеренным данным были применена формула (3.1), в результате чего было восстановлено изображение двух источников звука представленное на рисунке 3.13.

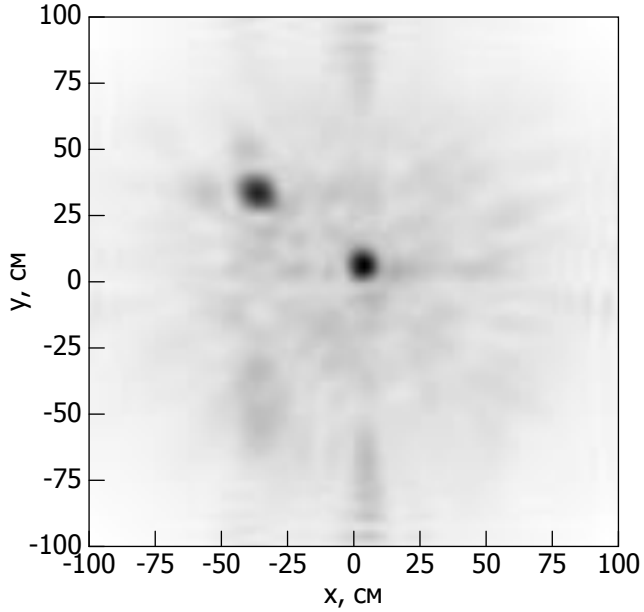


Рисунок 3.13 – Восстановление изображение двух источников звука.

Можно видеть, что результат эксперимента хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Точечные излучатели отчетливо визуализируются. То есть, показана возможность обнаружения источника совершенно произвольного сигнала. При этом не требуется априорной информации о форме сигнала, достаточно лишь, чтобы сигнал был широкополосным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы получены следующие результаты:

1. Предложен метод визуализации произвольных широкополосных источников звука для рассматриваемой системы
2. Разработанная экспериментальная установка на основе 160-ти электретных микрофонов расположенных с шагом 6 см на плоскости 10 рядов по 16 микрофонов с мультиплексированием DG406-DJ, позволяет производить параллельную оцифровку сигналов с каждого микрофона с частотой 7200 Гц и путем обработки методом амплитудной широкополосной пространственно - согласованной фильтрации, позволяет визуализировать источники звука на частотах до 3600 Гц с разрешением до 10 см в плоскости XY.
3. Разработано программное обеспечение для визуализации источников звука в реальном масштабе времени.
4. Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования согласуются.
5. Разработанная система найдёт применение для контроля состояния и исправности работающих механизмов и визуализации произвольных источников звука.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.: ил.
2. Грегуш П. Звуковидение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 232с.
3. Алешин Н.П., Лупачев В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: справочное пособие. – Мн. Выш. Шк. – 1987. – 271с.
4. Boomerang III [Электронный ресурс]. Режим доступа**:** http://www.raytheon.com, свободный доступ. Яз. англ. (дата обращения 17.09.2015)
5. Пат. 2285272 Российская Федерация, G01S5/18, G01S3/80 Способ определения местоположения стрелка на местности //Орешков О. В.,Лагута А. П. ,Потапов С. В. ,Власов В. И., заявитель патентообладатель Федерального агентства по атомной энергии Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" - ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"(RU). - № 2005102378/09; заявл. 31.01.2005; опубл. 10.10.2006. Бюл. № 28 – 12с.
6. A.Quinlan, M. Kawamoto, Y.Matsusaka et. al. Tracking Intermittently Speaking Multiple Speakers Using a Particle Filter // Journal on Audio, Speech, and Music Processing. – 2009. – P. 11
7. Хорев А.А. Средства акустической разведки: направленные микрофоны и лазерные акустические системы разведки // Спецтехника и связь. 2008. № 3. С.34-43
8. Norsonic [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.norsonic.com, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.09.2015).
9. Squarehead Technology [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.sqhead.com, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.09.2015)
10. T. Iyama; O. Sugiyama; T.Otsuka; K.Itoyama; H.G. Okuno. Visualization of auditory awareness based on sound source positions estimated by depth sensor and microphone array //IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems: – 2014.– P: 1908 – 1913.

11. Chandykunju Alex; Kevin Martin Jose; Arun Joseph. Sound localization and Visualization device // IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2013.– P: 262 – 264.
12. David Joseph Oldham; Christopher A. Egan. Investigating the Action of Complex Highway Noise Barriers by Means of Sound Field Visualization // Computer Graphics, Imaging and Visualisation, (CGIV '07), 2007. –P: 522 – 527.
13. Ерзакова Н.Н. Контроль состояния работающих механизмов по дистанционным измерениям акустического поля в воздухе // Современная техника и технология: Сб. науч. тр.– Томск: ТПУ, 2014 –Т.3. – С.122 – 124.
14. Суханов Д.Я., Ерзакова Н.Н. Восстановление изображений звукоизлучающих объектов по многопозиционным широкополосным дистанционным измерениям звукового поля // Известия ВУЗов. Физика. – Т. 56. – №8/2. – 2013. – С. 57 – 61.
15. Ерзакова Н.Н. Визуализация пластиковых звукоизлучающих объектов в воздухе // XX Всероссийская науч. конф. студентов-физиков: Сб. науч. тр.– Ижевск, 2014 – С. 485 – 486.
16. Суханов Д.Я., Ерзакова Н.Н. Визуализация звукоизлучающих объектов распределенных в объеме // Естественные и математические науки в современном мире : Сб. ст. по материалам XVIII междунар. науч.-практ. конф. № 18. Новосибирск: Изд. «СибАК». – 2014. – С.73 – 80.
17. Ерзакова Н.Н. Визуализация плоских звукоизлучающих объектов в воздухе // сб. тр. III Всероссийской науч. – практ. конф. «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». − Томск: Изд-во ТПУ, 2013. − Т. 1. − С. 126 − 128.
18. Пат. 154007 Российская Федерация, G01N 29/06 Сканирующая микрофонная решётка для ультразвуковой томографии //Суханов Д.Я, Ерзакова Н.Н., заявитель патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). - № 201414761000/28; заявл. 26.11.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22 – 2с.

19. Sukhanov D. Ya., Erzakova N.N. Image restoration of sound source objects using the linear array of scanning microphones // International Crimean conference microwave and telecommunication technology (CRIMICO). Proceedings. – 2014. – P. 950-951
20. Sukhanov D. Ya., Erzakova N.N. Three – deminshional ultrasound tomography using multi–angle bistatic sounding // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – 2015. – P.203–206.
21. Суханов Д.Я., Ерзакова Н.Н. Ультразвуковая томография с круговым сканированием линейной решёткой микрофонов // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VI научно-практической конференции, 2015.– С. 230-235.
22. Sukhanov D. Ya., Erzakova N.N. Визуализация источников звука на основе синхронной двумерной микрофонной решётки микрофонов // International Crimean conference microwave and telecommunication technology (CRIMICO). Proceedings. – 2015. – P. 968-969.
23. Суханов Д.Я., Ерзакова Н.Н. Локационная ультразвуковая томография с применением линейной решётки микрофонов // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т.58. – №8/3. – С.88–91.
24. Суханов Д.Я., Ерзакова Н.Н. Modeling of location sensing considering diffraction effect // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т.58. – №10/3. – С.259–262.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 154007

СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОФОННАЯ РЕШЁТКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет" (ТГУ, НИ ТГУ) (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2014147610**

Приоритет полезной модели **26 ноября 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***14 июля 2015 г.***

Срок действия патента истекает **26 ноября 2024 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

ПО

Автор(ы): ***Суханов Дмитрий Яковлевич (RU), Ерзакова Надежда Николаевна (RU)***

RU 154007 U1

Уважаемый пользователь! Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение.

Отчет о проверке № 1

дата выгрузки: 11.06.2016 19:30:00
пользователь: yerzakova-nadya@yandex.ru / ID: 3205861
отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»
на сайте http://www.antiplagiat.ru

Информация о документе

№ документа: 5
Имя исходного файла: ЕрзаковаНН_Магистерская_диссертация.doc
Размер текста: 8858 кБ
Тип документа: Прочее
Символов в тексте: 57835
Слов в тексте: 6676
Число предложений: 372

Оригинальность: 97.72%
Заимствования: 2.28%
Цитирование: 0%

Информация об отчете

Дата: Отчет от 11.06.2016 19:30:00 - Последний готовый отчет
Комментарии: не указано
Оценка оригинальности: 97.72%
Заимствования: 2.28%
Цитирование: 0%

Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
0.68%	[1] Скачать автореферат	http://tusur.ru	14.10.2012	Модуль поиска Интернет
0.4%	[2] Описание изобретения к патенту	http://topreferat.znate.ru	27.12.2012	Модуль поиска Интернет
0.34%	[3] том 3	http://tusur.ru	раньше 2011 года	Модуль поиска Интернет