

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.94:621.396.67

Калин
Алексей Валерьевич

Математическое моделирование алгоритмов оценки пространственного спектра
сигнала в акустических антенных решетках

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-39-80-02 РТСиУРРиТ

Научный руководитель

Калютчик Виталий Степанович

кандидат технических наук

Минск 2020

ВВЕДЕНИЕ

Методы оценки пространственного спектра сигнала предназначены для определения угловых координат источников излучения, расположенных в дальней зоне относительно антенной решетки. Оценка направлений прихода сигналов различной природы имеет широкий ряд приложений в локации, медицине, коммуникационных системах и других областях науки и техники.

Выбор метода оценки направлений прихода сигналов является важным этапом при проектировании системы акустической локации. В основе такой системы лежит микрофонная решетка, состоящая из нескольких пространственно-разнесенных приемников звука, работающих согласованно. Полученные при помощи микрофонов выборки после обработки по определенному алгоритму позволяют построить диаграмму распределения пространственного спектра сигнала, которая представляет собой зависимость мощности излучения P от угла прихода сигнала θ .

Актуальность магистерской диссертации

В общем случае разрешающая способность антенной решетки ограничена шириной главного лепестка, измеренного по уровню половинной мощности. В современных условиях антенная решетка должна обеспечивать высокую разрешающую способность по угловым координатам. Поэтому проблема увеличения разрешающей способности антенной решетки остается крайне актуальной и требует привлечения новых подходов и методов теории антенных решеток и цифровой обработки сигналов.

Современные методы обработки сигналов в антенных решетках объединяют в себя два подхода: обработка во временной области (метод задержек и суммирования) и обработка в частотной области (метод Кейпона, метод теплового шума, метод многосигнальной классификации и др.). Последние представляют особый интерес, поскольку позволяют значительно увеличить разрешающую способность решетки, не меняя ее конфигурации, а только лишь за счет специальной математической обработки.

Методы обработки в частотной области базируются на условии узкополосности спектров сигналов. Такое условие, как правило, выполнимо для радиосигнала, если ширина его спектра значительно меньше несущей частоты. Однако спектр акустического сигнала является широкополосным и занимает полосу в десятки кГц. Эта особенность накладывает ряд ограничений на применение известных методов оценки пространственного спектра узкополосных сигналов и требует их модификации.

Модификация методов оценки пространственного спектра связана с широкополосностью частотного спектра акустического сигнала. Это означает, что разрешающая пространственная функция должна являться результатом

взвешенного суммирования отдельных функций, соответствующих каждой частотой составляющей принятого сигнала.

Цель магистерской диссертации: разработка имитационной модели и сравнительный анализ модифицированных методов оценки пространственного спектра широкополосных акустических сигналов при различных условиях функционирования.

Задачи магистерской диссертации

1) Провести анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных изучению методов оценки пространственного спектра сигналов различной природы.

2) Изучить основные понятия из теории антенных решеток: конфигурация решеток, диаграмма направленности, математическая модель сигналов в каналах решетки.

3) Изучить математические модели существующих методов оценки пространственного спектра радиосигнала в антенных решетках.

4) Разработать имитационную модель модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала.

5) С помощью разработанной имитационной модели, провести сравнительный анализ методов и для каждого из них определить:

- зависимость разрешающей способности от количества элементов антенной решетки;

- зависимость разрешающей способности от частоты сигналов;

- зависимость разрешающей способности от направления прихода сигналов;

- зависимость вероятности обнаружения заданного количества источников и СКО определения угловых координат от отношения сигнал/шум в каналах решетки.

Объект исследования: акустическая антенная решетка.

Предмет исследования: модифицированные методы оценки пространственного спектра сигнала в акустических антенных решетках.

Предложенные модифицированные методы оценки пространственного спектра сигнала расширяют область применения известных частотных методов (*Bartlett*, *Capon*, *Thermal Noise* и *MUSIC*) построения разрешающей пространственной функции и позволяют обрабатывать не только узкополосные радиосигналы, но и широкополосные акустические сигналы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации рассмотрены методы оценки пространственного спектра широкополосных акустических сигналов в антенных решетках, основанные на модификации известных методов оценки пространственного спектра узкополосных радиосигналов: метод Кейпона (*Capon*), метод теплового шума (*Thermal Noise*) и метод многосигнальной классификации (*MUSIC*), позволяющих преодолеть предел Рэлея и увеличить разрешающую способность антенной решетки.

Приводятся функциональная схема и аналитические выражения, описывающие все этапы обработки сигналов в каналах решетки, имитационная модель, результаты имитационного моделирования и сравнительного анализа предлагаемых модифицированных методов.

Целью магистерской диссертации является разработка имитационной модели и сравнительный анализ модифицированных методов оценки пространственного спектра широкополосных акустических сигналов при различных условиях функционирования.

Для достижения цели в диссертации решены следующие задачи:

1) Проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных изучению методов оценки пространственного спектра сигналов различной природы.

2) Изучены основные понятия из теории антенных решеток: конфигурация решеток, диаграмма направленности, математическая модель сигналов в каналах решетки.

3) Изучены математические модели существующих методов оценки пространственного спектра радиосигнала в антенных решетках.

4) Разработана имитационная модель модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала.

5) С помощью разработанной имитационной модели проведен сравнительный анализ методов и для каждого из них определены:

– зависимость разрешающей способности от количества элементов антенной решетки;

– зависимость разрешающей способности от частоты сигналов;

– зависимость разрешающей способности от направления прихода сигналов;

– зависимость вероятности обнаружения заданного количества источников и СКО определения угловых координат от отношения сигнал/шум в каналах решетки.

Апробация работы проводилась в ходе выступления на международной военно-научной конференции «Проблемы обеспечения военной безопасности

государства в современных условиях, Военная академия Республики Беларусь, Минск, 2019».

Результаты работы были опубликованы в сборнике «56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск, 2020».

Положения, выносимые на защиту:

1) Имитационная модель модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала.

2) Сравнительный анализ модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала при помощи разработанной имитационной модели.

Предложенные модифицированные методы оценки пространственного спектра сигнала расширяют область применения известных частотных методов (*Bartlett*, *Capon*, *Thermal Noise* и *MUSIC*) построения разрешающей пространственной функции и позволяют обрабатывать не только узкополосные радиосигналы, но и широкополосные акустические сигналы.

Разработанная имитационная модель позволяет определять эффективность модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала при различных условиях функционирования, что позволяет ускорить проектирование акустических систем, предназначенных для определения угловых координат источников звука.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен анализ отечественных и зарубежных литературных источников по теме исследования.

Анализ источников показал, что на сегодняшний день хорошо изучены «сверхразрешающие» методы, предназначенные для узкополосных радиосигналов. Для них имеются детальное описание математического аппарата, функциональные схемы, результаты моделирования и практических исследований.

Методы «сверхразрешения», предназначенные для оценки пространственного спектра широкополосных акустических сигналов в литературе освещены очень кратко: не приводятся функциональные схемы, математические модели расписаны в сжатом виде, отсутствует сравнительный анализ различных методов.

Таким образом, наличие практической потребности в обработке широкополосных акустических сигналов и текущее состояние вопроса цифровой обработки сигналов в акустических антенных решетках обусловили необходимость и актуальность решения задач, рассматриваемых в диссертации.

В главе 2 рассмотрены:

- определение и классификация антенных решеток: по способу размещения элементов, по межэлементному расстоянию, по направлению максимума излучения/приёма в пространстве;

- математическая модель сигналов в каналах антенной решетки: получены обобщенные выражения, а также частные случаи для линейной, и кольцевой решеток;

- понятие диаграммы направленности антенной решетки и ее наиболее важные параметры: ширина основного лепестка (по уровню -3 дБ), уровень боковых лепестков (либо отношение уровня основного лепестка к уровню боковых), «индекс направленности», а также угловое разрешение.

Глава 3 содержит:

- обобщенную функциональную схему алгоритма оценки пространственного спектра радиосигнала, а также основные матричные параметры, используемые при адаптивной обработке сигналов в антенных решетках;

- методы оценки пространственного спектра радиосигнала, их достоинства и недостатки;

- условия однозначной оценки пространственного спектра сигнала;

- математическую модель методов оценки пространственного спектра радиосигнала в линейной пятиэлементной решетке, а также графики разрешающих пространственных функций для каждого метода.

Глава 4 посвящена разработке имитационной модели модифицированных методов оценки пространственного спектра акустических сигналов:

- предложена обобщенная функциональная схема модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала;

- записаны математические выражения, описывающие все этапы обработки сигналов в каналах антенной решетки;

- приведены модифицированные формулы методов *Bartlett*, *Capon*, *Thermal Noise* и *MUSIC*, которые учитывают широкополосность акустического сигнала;

- дано обоснование выбранной среды разработки имитационной модели *LabVIEW*, сформулированы задачи имитационной модели;

- подробно описан интерфейс ввода входных параметров и управление процессом моделирования: выбор модели решетки, метода вычисления корреляционной матрицы, метода усреднения разрешающих пространственных функций и прочее;

- рассмотрены инструменты анализа результатов моделирования: задание параметров сечения разрешающей пространственной функции, определение количества ее максимумов, их координаты и другие;

описаны основные блок-диаграммы алгоритмов обработки сигналов во временной и частотной областях: панели ввода и вывода, виртуальные приборы, соединительные шины и проводники.

В главе 5 приводятся результаты сравнительного анализа модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала. Получены следующие зависимости:

- зависимость разрешающей способности методов от количества элементов антенной решетки;

- зависимость разрешающей способности методов от частоты сигналов;

- зависимость разрешающей способности методов от направления прихода сигналов;

зависимость вероятности обнаружения заданного количества источников и СКО определения угловых координат методов «сверхразрешения» от отношения сигнал/шум в каналах решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магистерская диссертация посвящена изучению и исследованию методов оценки пространственного спектра акустических сигналов.

В диссертации были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Проанализированы исследования отечественных и зарубежных авторов, связанных с вопросами современных методов оценки пространственного спектра сигналов различной природы. Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день хорошо изучены «сверхразрешающие» методы, предназначенные для обработки узкополосных радиосигналов и слабо освещены методы «сверхразрешения», предназначенные для оценки пространственного спектра широкополосных акустических сигналов. Наличие практической потребности в обработке широкополосных акустических сигналов и текущее состояние вопроса цифровой обработки сигналов в акустических антенных решетках обусловили необходимость и актуальность решения задач, рассмотренных в диссертации.

2. Изучены наиболее важные вопросы из теории антенных решеток: определение и классификация антенных решеток, математическая модель сигналов в каналах антенной решетки и понятие диаграммы направленности антенной решетки.

3. Рассмотрены обобщенная функциональная схема алгоритма оценки пространственного спектра радиосигнала, а также основные матричные параметры, используемые при адаптивной обработке сигналов в антенных решетках. Приведены достоинства и недостатки существующих методов оценки пространственного спектра радиосигнала: *Bartlett*, *Capon*, *Thermal Noise* и *MUSIC*. При помощи программы *Mathcad* выполнено математическое моделирование методов оценки пространственного спектра радиосигнала в линейной пятиэлементной решетке.

4. Предложена обобщенная функциональная схема модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала. Разработана и описана имитационная модель модифицированного алгоритма оценки пространственного спектра акустических сигналов. Записаны математические выражения, описывающие все этапы обработки сигналов в каналах антенной решетки. Приведены модифицированные формулы методов *Bartlett*, *Capon*, *Thermal Noise* и *MUSIC*, которые учитывают широкополосность акустического сигнала. Подробно описан интерфейс ввода входных параметров и управление процессом моделирования, а также рассмотрены инструменты анализа результатов моделирования. Описаны основные блок-диаграммы алгоритмов обработки сигналов во временной и частотной областях.

5. При помощи разработанной имитационной модели проведен сравнительный анализ модифицированных методов оценки пространственного спектра сигнала: *Bartlett*, *Capon*, *Thermal Noise* и *MUSIC*. Определены следующие зависимости:

- зависимость разрешающей способности методов от количества элементов антенной решетки;
- зависимость разрешающей способности методов от частоты сигналов;
- зависимость разрешающей способности методов от направления прихода сигналов;
- зависимость вероятности обнаружения заданного количества источников и СКО определения угловых координат методов «сверхразрешения» от отношения сигнал/шум в каналах решетки.

Результаты, полученные в процессе выполнения магистерской диссертации расширяют область применения существующих на сегодняшний день методов оценки пространственного спектра сигнала, а разработанная имитационная модель позволяет определять их эффективность при различных условиях функционирования, что может ускорить проектирование акустических систем, предназначенных для определения угловых координат источников звука.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Имитационная модель методов оценки пространственного спектра акустического сигнала // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – Минск, – 2020.

2. Сравнительный анализ методов оценки пространственного спектра акустического сигнала // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – Минск, – 2020.

Библиотека БГУИР