

на правах рукописи



Таюр Антон Викторович

Имитационное моделирование отражающих объектов, распределенных
по угловым координатам, с помощью матричных имитаторов

Специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Киселев Алексей Васильевич,**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Шипилов Сергей Эдуардович,**
доктор физико-математических наук, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский государственный
университет», кафедра радиофизики, профессор
кафедры;

Коврегин Валерий Николаевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, доцент, Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения», кафедра аэрокосмических
измерительно-вычислительных комплексов,
доцент кафедры.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники».

Защита диссертации состоится «16» декабря 2025 г. в 14:00 часов
на заседании диссертационного совета 24.2.347.02 при Федеральном
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет», по адресу: 630073,
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент

Максим Андреевич Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования определяется следующими факторами. Обязательным этапом разработки современных радиотехнических средств и систем является этап разработки их программного обеспечения, проводимый с использованием технологий полунатурного моделирования. Его суть заключается в создании в лабораторных условиях модели реальной радиоэлектронной обстановки, в которой будет функционировать разрабатываемый объект. При этом наибольшая достоверность моделирования обеспечивается при имитации электромагнитных полей на апертуре антенны создаваемого устройства. Наиболее перспективными имитаторами являются, так называемые, матричные имитаторы радиоэлектронной обстановки (сокращенно МИ). Они представляют собой систему излучателей, размещаемых в дальней зоне антенны испытуемого устройства. К ним подводятся взаимосвязанные сигналы, обеспечивающие формирование так называемых кажущихся центров излучения (сокращенно КЦИ), угловое положение которых соответствует замещаемым источникам излучения или отражения сигналов. Меняя амплитуды сигналов, подводимых к излучателям МИ, обеспечивают перемещение КЦИ в соответствии с заданными изменениями моделируемой радиоэлектронной обстановки.

Матричные имитаторы практически не имеют ограничений по скорости перемещения замещаемых объектов и сложности их структуры. При этом ключевым вопросом, как и при использовании других видов средств имитации, является достоверность воспроизведения МИ реальной радиоэлектронной обстановки. Достоверность имитации в первую очередь определяется точностью установки параметров сигналов, создаваемых замещаемым объектом.

Вопросы точности МИ рассматривались в литературе неоднократно. В связи с этим уместно назвать работы и исследования **Островитянова Р. В., Басалова Ф. А., Важенина В. Г., Тырыкина С. В. и др.** В них подробно анализировались эквивалентные искажения диаграммы направленности антенны, влияние случайных и детерминированных ошибок в фазах и амплитудах сигналов излучателей МИ на его точностные характеристики. Однако этим безусловно интересным и важным исследованиям присущ общий недостаток. Большинство из них выполнены либо при условии изотропности измерительной антенны разрабатываемого устройства, либо при использовании простейших аппроксимаций ее диаграммы направленности, а диапазон задаваемых положений КЦИ ограничен областью между излучателями МИ.

Кроме того, практически не рассмотренными остаются вопросы точности имитации угловых шумов координат применительно к моделированию отражений от распределенных объектов.

Настоящая работа посвящена развитию теории матричных имитаторов применительно к моделированию отражений от распределенных объектов. При этом основное внимание уделено точности имитации их угловых шумов (шумов угловых координат – ШК), в первую очередь их вероятностных характеристик и параметров, таких как функция распределения, математическое ожидание и дисперсия, определяющих точности установки положения и его разброс по

угловым координатам. Данные вопросы до настоящего времени в литературе не рассматривались.

Это определило цель работы.

Цель работы – установить причины возникновения и оценить параметры ошибок моделирования матричным имитатором основных вероятностных характеристик шумов угловых координат распределенных радиолокационных объектов.

Достижение поставленной цели потребовало решить следующие **основные задачи**.

1. Получить общие соотношения для ошибки установки углового положения кажущегося центра излучения распределенного объекта, возникающей при работе с неизотропными антеннами.

2. Оценить ошибки имитации вероятностных характеристик шумов угловых координат распределенных радиолокационных объектов, моделируемых матричным имитатором.

3. Экспериментально проверить полученные теоретические результаты, а также развить их до уровня, позволяющего синтезировать матричные имитаторы протяженных объектов, обеспечивающие заданную достоверность имитации их угловых шумов.

Объектом исследования являются матричные имитаторы радиоэлектронной обстановки, применяемые для моделирования распределенных отражающих объектов.

Предметом исследования являются ошибки моделирования вероятностных характеристик шумов угловых координат распределенных отражающих объектов, возникающие при использовании матричных имитаторов.

Методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы методы теории вероятностей и математической статистики, теории радиолокационных измерений, методы математического анализа, а также методы численного моделирования.

Научная новизна работы

1. Показано, что замещение точечных объектов геометрическими моделями, составленными из малого, равного двум, количества точек, приводит к появлению погрешностей установки углового положения кажущегося центра излучения. Получены соотношения, связывающие эти ошибки с диаграммой направленности антенны, расстоянием между излучателями матричного имитатора и задаваемым положением кажущегося центра излучения.

2. Показано, что ошибки установки положения кажущегося центра излучения, возникающие в матричных имитаторах, приводят к ошибкам моделирования шумов координат распределенных объектов.

3. Получены выражения, позволяющие оценить ошибки моделирования функции распределения, математического ожидания шумов угловых координат и параметра, определяющего их разброс, в зависимости от разнораспределения излучателей матричного имитатора, размера и положения замещаемого объекта,

распределения отражающих свойств по его поверхности и формы диаграммы направленности антенны.

4. Получены условия и соотношения, позволяющие определить разнос излучателей матричного имитатора и ограничения на размеры и положение замещаемого объекта, при которых обеспечивается заданная достоверность имитации шумов угловых координат.

5. Проведена экспериментальная проверка полученных теоретических результатов и выводов, подтвердившая их правильность и обоснованность.

Теоретическая и практическая ценность работы

Полученные соотношения позволяют выбирать оптимальный разнос излучателей и область размещения объекта относительно матрицы матричного имитатора с целью обеспечения заданной точности имитации шумов координат. Проведено моделирование на стенде протяженного морского объекта. Эксперимент подтвердил теоретические расчёты. Указанные результаты обладают высокой теоретической новизной и представляют значительный интерес для дальнейших исследований в области радиолокационного моделирования.

Полученные результаты практически значимы, поскольку могут быть внедрены в разработку матричных имитаторов эхосигналов от распределенных объектов. В частности:

1. Полученные выражения для расчета ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения позволяют проводить оценку точностных характеристик матричного имитатора, во-вторых, задавать разнос излучателей матричного имитатора, при котором гарантируется заданный уровень ошибок.

2. Полученные выражения для расчета ошибок установки вероятностных характеристик шумов угловых координат распределенных отражающих объектов позволяют выбирать оптимальный разнос излучателей матричного имитатора, определять соотношение между размером разнosa и размерами имитируемого объекта, а также устанавливать взаимное положение объекта имитации и матрицы с целью обеспечения заданного гарантированного уровня ошибок.

3. Результаты, полученные при решении задачи синтеза матричного имитатора отражений от морского корабля, могут быть непосредственно использованы при разработке матричных имитаторов и их программного обеспечения.

Достоверность и обоснованность научных положений, выносимых на защиту, подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами натурных экспериментов, результатами имитационного моделирования, а также положительным опытом апробации и внедрения полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Замещение точечных объектов двухточечными геометрическими моделями, лежащее в основе построения матричных имитаторов, приводит к появлению специфических ошибок установки углового положения, зависящих

от формы главного лепестка диаграммы направленности антенны исследуемой радиотехнической системы (РТС), разноса точек модели и положения точечного объекта относительно них.

2. Ошибки установки углового положения, имеющие место в матричных имитаторах, при моделировании распределенных объектов приводят к погрешностям имитации вероятностных характеристик угловых шумов и асимметрии функции распределения ШК. Изменяются ее математическое ожидание и параметр, определяющий рассеяние.

3. Ошибки значений математического ожидания и параметра, определяющего рассеяние ШК, определяются разносом излучателей матричного имитатора, формой ДН антенны РТС, свойствами объекта (распределением блестящих точек по поверхности) и его положением. Величина ошибки математического ожидания может варьироваться от 0 до 77 %, а параметра, определяющего рассеяние, – от 0 до 70 % от требуемого. Наибольшие значения ошибок получаются при использовании РТС с антенной, главный лепесток диаграммы направленности которой имеет вид экспоненты Гаусса шириной, совпадающей с разносом излучателей матричного имитатора и угловыми размерами замещаемого объекта.

Апробация работы. Результаты диссертационных исследований докладывались на научных конференциях:

- Региональной научной студенческой конференции, посвященной году науки и технологий в России, «Интеллектуальный потенциал Сибири», г. Новосибирск, 2021 г.,
- Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, 2022 г., 2023 г.,
- International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Erlagol, 2022 г.,
- International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023), Novosibirsk, 2023 г.

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах, в том числе: 5 статей – в изданиях, включённых в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени (перечень ВАК); 1 статья – в научном журнале, индексируемом в базах Scopus / Web of Science; 3 публикации – в сборниках конференций, индексируемых в базах Scopus / Web of Science; 3 публикации – в материалах всероссийских и международных конференций.

Из 12 опубликованных работ 12 написаны в соавторстве. В материалах, опубликованных в соавторстве, результаты, относящиеся к теме диссертационной работы, получены автором лично. Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах составляет не менее 60 % и состоит: в постановке задач и проведении исследований, расчётов и обобщении полученных результатов.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены

автором лично. Автором сформулированы причины появления специфических ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения при замещении распределённого радиолокационного объекта двухточечной моделью и выведены аналитические соотношения, описывающие влияние этих ошибок на вероятностные характеристики шумов угловых координат протяжённых объектов.

Автором выявлены ключевые факторы, определяющие величину ошибки: разнос излучателей матрицы, форма главного лепестка диаграммы направленности антенны, относительное положение объекта и распределение блестящих точек по его поверхности. Проанализированы предельные случаи, указывающий на сценарий, вызывающий наибольшую ошибку, и обоснован оптимальный выбор параметров. Автором также сформулирована методика и проведено полунатурное моделирование на стенде, полностью подтвердившее теоретические расчёты.

Внедрение результатов исследования. Результаты диссертационной работы были внедрены на предприятии АО «ЗАСЛОН» (г. Санкт-Петербург) и в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы, состоящего из 111 источников, и приложения. Текст изложен на 149 страницах, содержит 64 рисунка, 15 таблиц и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе представлен обзор механизмов и особенностей формирования эхосигналов и их характеристик от распределенных отражающих объектов, а также методов их имитационного моделирования.

Отмечено, что наиболее перспективным техническим средством моделирования протяженных по угловым координатам объектов являются матричные имитаторы, принцип работы которых основан на замещении объекта его простейшей геометрической моделью и распределением имитирующего сигнала между ее точками. МИ выгодно отличается от имитаторов с механическим перемещением практически полным отсутствием ограничений на скорость и траектории перемещения, а также относительной простотой реализации.

Имитация распределенных объектов с помощью МИ возможна двумя путями. Первый из них заключается в имитации эхосигналов от точек многоточечной геометрической модели объекта, второй – в замещении объекта одной точкой, воспроизводящей текущее положение КЦИ замещаемого объекта, а также суммарный эхосигнал от него.

Подчеркнуто, что определяющее значение при обосновании методов имитации отраженных сигналов имеет достоверность моделирования, в первую очередь точность установки положения замещаемого объекта и параметров его ШК.

Результаты анализа точностных характеристик МИ, полученные в ходе

обзора литературы, показали, что уровень исследований недостаточен для моделирования угловых ШК. В известных исследованиях основное внимание уделено эквивалентным искажениям диаграммы направленности антенны РТС при перемещениях КЦИ в пределах, ограниченных излучателями МИ. Достоверность моделирования вероятностных характеристик ШК не рассмотрена. Это позволило сформулировать цель и основные задачи настоящей работы, направленные на анализ адекватности имитации угловых ШК распределенных объектов с помощью МИ.

Второй раздел посвящен оценке ошибок установки углового положения, возникающих при работе с МИ, обусловленных замещением моделируемого объекта дискретной моделью.

Рассматривается простейший МИ, схематично представленный на рисунке 1, где положение КЦИ указано в нормированной к половине базы матрицы величине $\xi_{\text{треб}}$. Определенное измерительной антенной положение КЦИ, обозначенное как $\xi_{\text{изм}}$, отстоит от требуемого значения на величину ошибки (χ). Угловое положение оси ДН, отсчитываемое от центра матрицы, обозначено как α_0 .

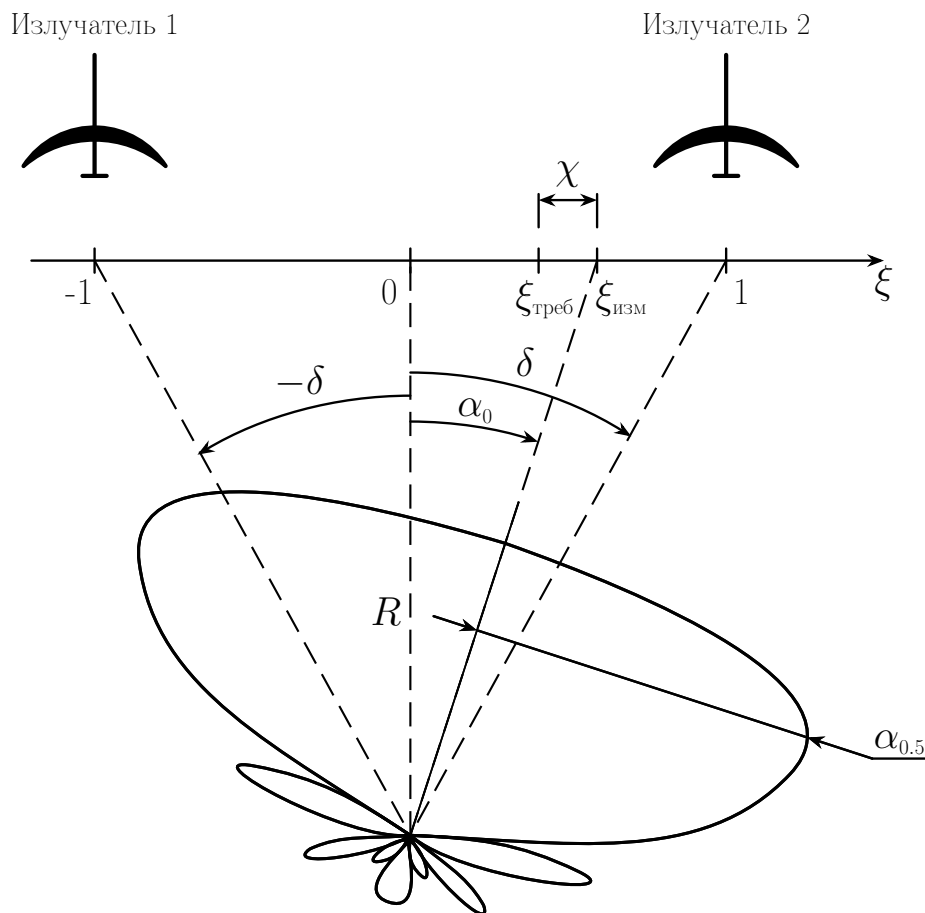


Рисунок 1 – МИ с двумя излучателями

Последовательно рассмотрены варианты пеленгации объекта антенной, имеющей игольчатую и S-образную разностную формы главного лепестка ДН.

При использовании амплитудного метода пеленгации, суть которого заключается в определении угловой координаты КЦИ путем поворота

направленной антенны в плоскости расположения излучателей МИ и фиксации ее углового положения, соответствующего максимальному уровню принимаемого сигнала, имеем следующее.

Ошибка определения положения КЦИ

$$\chi(\xi) = \xi_{\text{изм}} - \xi_{\text{треб}}.$$

Амплитуда сигнала на выходе приемной антенны:

$$U_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim F(\alpha_0 + \delta) \cdot \dot{S}_1(\xi) + F(\alpha_0 - \delta) \cdot \dot{S}_2(\xi).$$

Для вывода общих соотношений, инвариантных к форме ДН, $F(\alpha)$ аппроксимируется степенным полиномом:

$$F_a(\alpha) = r_0 + r_1 \cdot \alpha + r_2 \cdot \alpha^2 + r_3 \cdot \alpha^3 + r_4 \cdot \alpha^4,$$

где $F_a(\alpha)$ – результат аппроксимации ДН; $F^{(n)}(\alpha_a)$ – n -я производная функции $F(\alpha)$ в точке α_a ; $\alpha_a=0$ – точка, в окрестности которой производится аппроксимация ДН.

Показано, что аппроксимация ДН полиномом второй степени, используемая в исследованиях других авторов, не позволяет выявить ошибку установки углового положения КЦИ.

Увеличение степени полинома до четвертой позволило получить выражение для нахождения ошибки в виде:

$$\chi(\xi) = -\text{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 + (1 - \xi^2)3P^2 + (1 - 2\xi^2 + \xi^4)3P + \xi^4 - 2\xi^2 + 1 + (\xi^3 - \xi) \times}} \right. \\ \left. \times (1 + j\sqrt{3}) \right], \quad (1)$$

где $P = 1/\delta^2 \cdot r_2/(6r_4)$.

Проанализировано влияние ДН и параметров МИ на величину ошибки.

Установлено, что она имеет место во всей области возможных угловых положений КЦИ, как в пределах матрицы, так и за ее пределами. Причем в последнем случае она быстро нарастает с ростом отклонения положения КЦИ от краев МИ. Ошибка имеет нулевые значения только для трех положений КЦИ – в центре матрицы и на ее краях (в точках, совпадающих с положениями излучателей).

Величина ошибки зависит от разноса излучателей МИ, углового положения КЦИ и формы ДН. Точнее, от нелинейности пеленгационной характеристики антенны, определяемой отношением коэффициентов полинома, аппроксимирующего диаграмму: r_2/r_4 для игольчатой ДН. При этом наибольшая ошибка имеет место для ДН вида экспоненты Гаусса, а наименьшая – для ДН вида $\cos$.

Показано, что причиной возникновения ошибки является замещение точечного объекта двухточечной моделью, которая при нелинейной пеленгационной характеристике антенны приводит к ошибке установки углового положения.

Результаты, полученные для игольчатой диаграммы развиты на разностную ДН и на установку положения КЦИ одновременно по двум угловым координатам.

Третий раздел направлен на развитие результатов, полученных во втором разделе, применительно к оценкам вероятностных характеристик угловых шумов угловых координат замещающего распределенного объекта.

Получены выражения для плотности распределения вероятности (ПРВ) ШК при работе с МИ на различных участках (за пределами матрицы, где ошибка (описываемая формулой 1) практически линейна ($W_{изм1}$ и $W_{изм4}$)), а также в пределах матрицы, где ошибка близка к квадратичной функции ($W_{изм2}$ и $W_{изм3}$):

$$W_{изм1}(\xi_{изм}) = \frac{\mu}{2 \left(1 + \mu^2 \cdot \left(\frac{\xi_{изм} - a_0}{1 + a_1} - m \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{|1 + a_1|};$$

$$W_{изм2}(\xi_{изм}) = \frac{\mu}{2 \left(1 + \mu^2 \cdot \left(-\frac{b_1 + 1 + \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \times$$

$$\times \left| -\frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}} \right| +$$

$$+ \frac{\mu}{2 \left(1 + \mu^2 \cdot \left(-\frac{b_1 + 1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}} \right|;$$

$$W_{изм3}(\xi_{изм}) = \frac{\mu}{2 \cdot \left(1 + \mu^2 \cdot \left(\frac{b_1 + 1 + \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \times$$

$$\times \left| -\frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}} \right| +$$

$$+ \frac{\mu}{2 \cdot \left(1 + \mu^2 \cdot \left(\frac{b_1 + 1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}} \right|;$$

$$W_{изм4}(\xi_{изм}) = \frac{\mu}{2 \cdot \left(1 + \mu^2 \cdot \left(\frac{\xi_{изм} + a_0}{1 + a_1} - m \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{|1 + a_1|},$$

где a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 – коэффициенты аппроксимации функции ошибки (формула 1); μ – параметр, обратно пропорциональный ширине ПРВ.

При положении объекта t в интервале между точками модели, но не в ее центре (рисунки 2, б и 3, б), при работе с МИ: возникает ошибка в математическом ожидании ШК; $W_{\text{изм}}(\xi_{\text{изм}})$ становится несимметричной; увеличивается рассеяние ШК.

Результаты расчетов по полученным формулам представлены на рисунке 2.

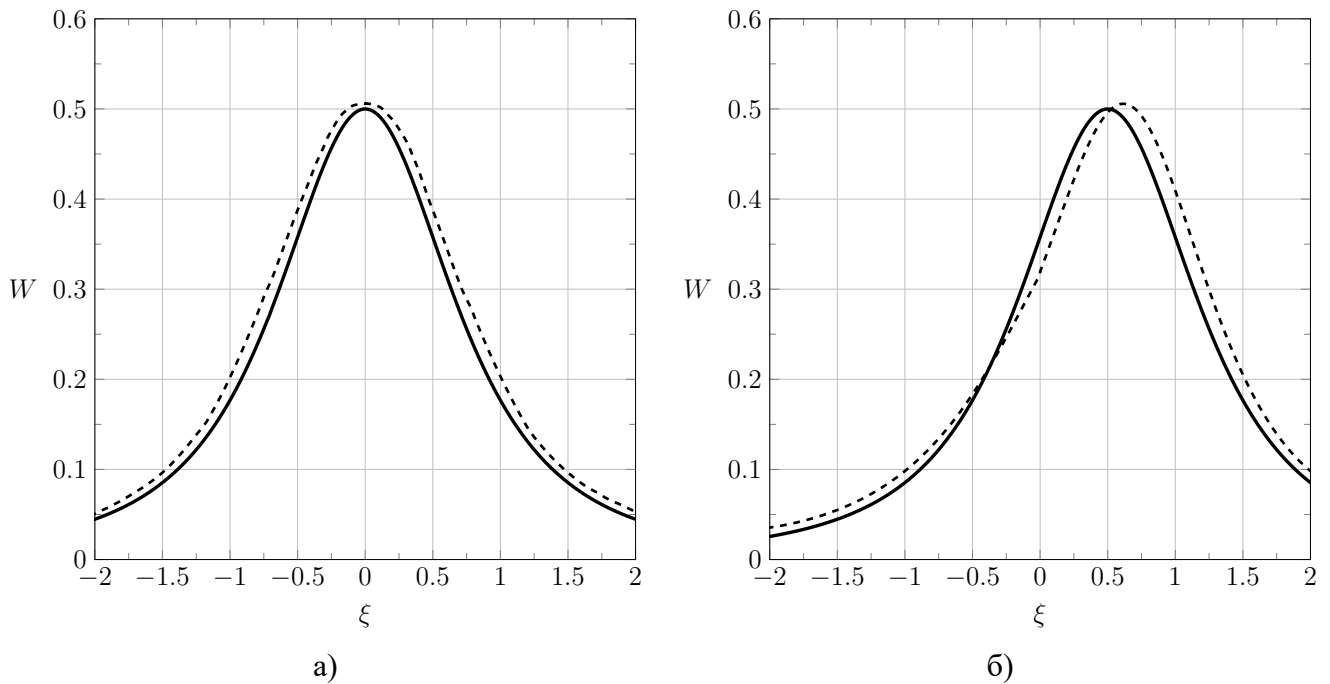


Рисунок 2 – ПРВ ШК объекта и его имитации с помощью МИ для $\mu=1$, а) $t=0$ и б) $t=0.5$

Результаты для $\mu=2$ приведены на рисунке 3.

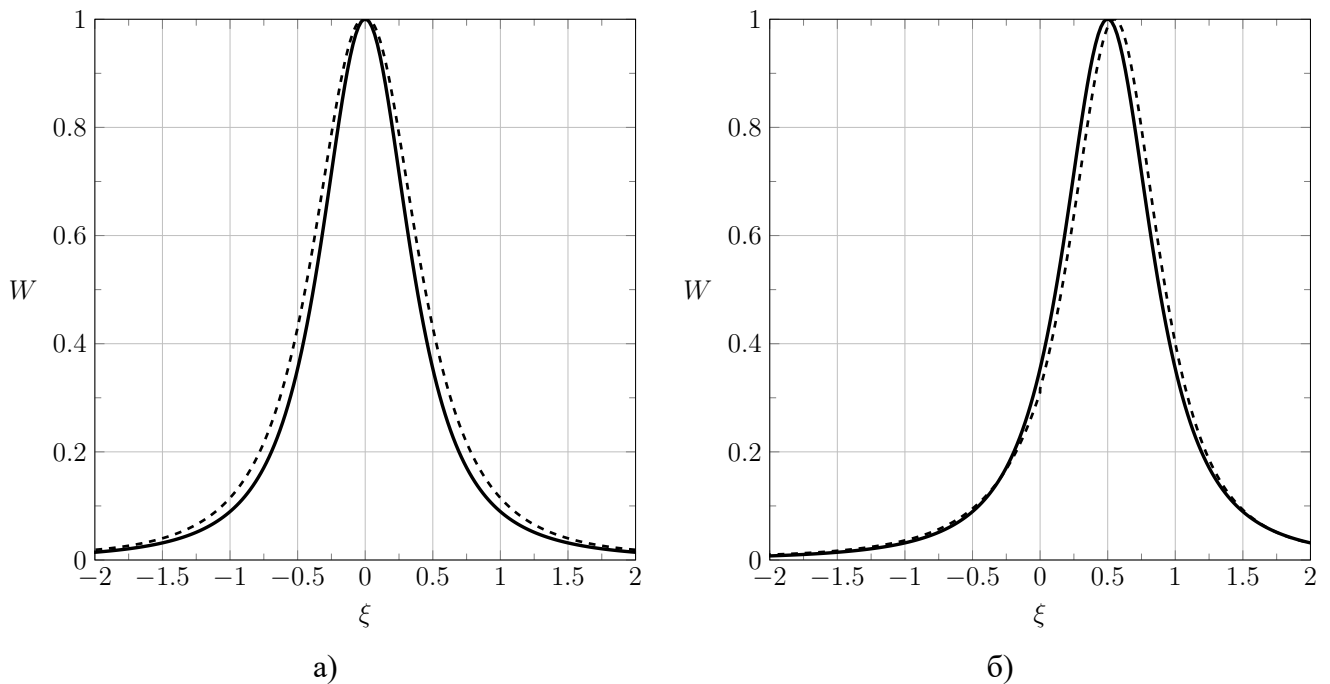


Рисунок 3 – ПРВ ШК объекта и его имитации с помощью МИ для $\mu=2$, а) $t=0$ и б) $t=0.5$

Анализ полученного выражения и результаты расчетов показывают,

что ошибки установки углового положения, обусловленные замещением распределенных объектов их двухточечными моделями, приводят к искажениям функции распределения имитируемых шумов угловых координат, а также к погрешностям установки их параметров.

Получены общие соотношения для математического ожидания ошибки установки среднего значения – математического ожидания угловых шумов имитируемого МИ объекта:

$$m_{\chi} = - \frac{1}{2\mu^2 \sqrt{\mu^2 m^2 + 1} \sqrt{(\xi_{TP} + m)^2 \mu^2 + 1} \sqrt{1 + (m - \xi_{TP})^2 \mu^2}} \times \\ \times \left(\left(\left((-2a_1 m \mu^2 - \operatorname{arsh}(\mu(m - \xi_{TP})))b_2 - \operatorname{arsh}(\mu(\xi_{TP} + m))b_2 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2\operatorname{arsh}(m\mu)b_2 \right) \sqrt{\mu^2 m^2 + 1} + 2((b_2 m^2 + b_0)\mu^2 + b_2)m\mu \right) \times \\ \times \sqrt{(\xi_{TP} + m)^2 \mu^2 + 1} + \sqrt{\mu^2 m^2 + 1} \mu \times \\ \times \left((-b_2 m^2 + (a_1 - b_1)m + a_0 - b_0)(\xi_{TP} + m)\mu^2 - b_2 m + \right. \\ \left. + b_2 \xi_{TP} + a_1 - b_1 \right) \sqrt{1 + (m - \xi_{TP})^2 \mu^2} + \sqrt{(\xi_{TP} + m)^2 \mu^2 + 1} \times \\ \times \sqrt{\mu^2 m^2 + 1} \mu \left((-b_2 m^2 + (-a_1 + b_1)m + a_0 - b_0)(m - \xi_{TP}) \times \right. \\ \left. \times \mu^2 - b_2 m - b_2 \xi_{TP} - a_1 + b_1 \right) \right).$$

Показано, что ошибка по математическому ожиданию зависит от коэффициентов аппроксимирующего полинома ДН, положения и размеров замещаемого объекта, разнота излучателей МИ и ряда других факторов. Получена численная оценка этой ошибки.

Получены также соотношения для оценки ошибки рассеяния шумов угловых координат. Для этого использованы оценки величины, аналогичной квадрату среднеквадратического отклонения шумов координат. Выявлена ее зависимость от параметров МИ, объекта и ДН.

$$\chi_{\sigma^2} = - \frac{1}{2(\xi_{TP}^2 \mu^2 + 1)^{3/2} \sqrt{\xi_{\max}^2 \mu^2 + 1} \mu^4} \left(3 \left(\left(\left(2(-2b_2^2 m^2 - \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \frac{2b_0 b_2 + (a_1 + 2 + b_1)(a_1 - b_1)}{3} \right) \mu^2 - \frac{2b_1 b_2 \mu}{3} + b_2^2 \right) \operatorname{arsh}(\xi_{TP} \mu) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{3} \left((-2a_1 \mu(a_1 + 2) \operatorname{arsh}(\xi_{\max} \mu) + (a_1^2 + 5a_1 + 2)m^2 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + a_0(-2a_1 - 1)m + a_0^2 \right) \mu^3 + 4((3b_1 + 1)b_2 m^2 + b_0(b_1 + 1))\mu^2 + \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2(4b_2^2 m^2 + b_1^2 + b_1)\mu - 8b_2(b_1 + 1))\mu \right) \right) \sqrt{\xi_{\max}^2 \mu^2 + 1} - \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \left((-2a_1 \mu(a_1 + 2) \operatorname{arsh}(\xi_{\max} \mu) + (a_1^2 + 5a_1 + 2)m^2 + \right. \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& +a_0(-2a_1-1)m+a_0^2\Big)\mu^3+4\big((3b_1+1)b_2m^2+b_0(b_1+1)\big)\mu^2+ \\
& +2\big(4b_2^2m^2+b_1^2+b_1\big)\mu-8b_2(b_1+1)\mu\Big)\sqrt{\xi_{\max}^2\mu^2+1}- \\
& -\frac{2\mu^3\big(\xi_{\max}\big((a_1^2+2a_1)m^2+a_0^2\big)\mu^2-\xi_{\max}a_1^2+2(a_0-\xi_{\max})a_1+2a_0\big)}{3}\Big)\times \\
& \times\big(\xi_{\text{TP}}^2\mu^2+1\big)^{3/2}+\sqrt{\xi_{\max}^2\mu^2+1}\times \\
& \times\Bigg(\left(\frac{2b_2^2\big(\xi_{\text{TP}}^2\mu^2+1\big)\text{arsh}^2(\xi_{\text{TP}}\mu)-2b_2\mu\big(\xi_{\text{TP}}^2\mu^2+1\big)(b_1+1)\text{arsh}(\xi_{\text{TP}}\mu)}{3}+\right. \\
& +\left(\frac{2b_2^2m^4+(-2+4b_0b_2-a_1^2+(-1+4b_1)a_1+2b_1)m^2}{3}+\right. \\
& +\left.\frac{2a_0(a_1+1/2)m+2b_0^2+a_0^2}{3}\right)\xi_{\text{TP}}^2\mu^4+\frac{8\xi_{\text{TP}}^2b_2m^2(a_1+1)\mu^3}{3}+ \\
& +\left(4\left(-b_2^2m^2-\frac{b_0b_2}{3}\right)\xi_{\text{TP}}^2+ \right. \\
& +\left.\frac{2\big(4(3/4+b_1/2+a_1)b_2m^2+b_0+a_0+2a_0a_1+2b_0b_1\big)\xi_{\text{TP}}}{3}+ \right. \\
& +\left(-\frac{a_1^2-3a_1-2}{3}\right)m^2+\frac{2a_0(a_1+1/2)m+a_0^2}{3}\Big)\mu^2+ \\
& +\frac{8b_2m^2(a_1+1)\mu+2\xi_{\text{TP}}^2b_2^2-4(b_1+1/2)b_2\xi_{\text{TP}}}{3}+ \\
& +\left.\frac{2b_1^2-8b_2^2m^2+2b_1+2a_1^2+2a_1}{3}\right)\mu^2\Bigg)\sqrt{\xi_{\text{TP}}^2\mu^2+1}- \\
& -\frac{1}{3}\Bigg(2\left(-2\left(\xi_{\text{TP}}(b_2m^2+b_0)\mu^2-\xi_{\text{TP}}b_2+b_1+\frac{1}{2}\right)\times b_2\text{arsh}(\xi_{\text{TP}}\mu)\right)+ \\
& +\left(b_2^2m^4+(-a_1^2+2a_1b_1+2b_0b_2+b_1^2+2b_1)m^2+a_0^2+b_0^2\right)\xi_{\text{TP}}\mu^4+ \\
& +4\left(\left(\frac{3}{4}+\frac{b_1}{2}+a_1\right)b_2m^2+\frac{b_0(b_1+1/2)}{2}\right)\xi_{\text{TP}}\mu^3+ \\
& +\left(\frac{b_2^2\xi_{\text{TP}}^3}{2}-2b_2(b_1+1)\xi_{\text{TP}}^2+\left(-6b_2^2m^2+a_1^2-2b_0b_2-b_1^2+2a_1-2b_1\right)\xi_{\text{TP}}+ \right. \\
& +4\left(a_1+\frac{3(b_1+1)}{2}\right)b_2m^2+2b_0b_1-a_0+2b_0\Big)\mu^2+\left((-2b_1-1)b_2\xi_{\text{TP}}+ \right. \\
& +2b_1^2+2b_1\Big)\mu-4\left(-\frac{3\xi_{\text{TP}}b_2}{8}+b_1+1\right)b_2\Bigg)\mu\big(\xi_{\text{TP}}^2\mu^2+1\big)\Bigg)\Bigg).
\end{aligned}$$

В целом результаты третьего раздела позволяют оценить ошибки установки вероятностных характеристик (ПРВ, математического ожидания и рассеяния) шумов угловых координат имитируемого распределенного объекта, а также

сформулировать меры по их снижению.

Четвертый раздел посвящен вопросам экспериментальной проверки и практического использования полученных результатов. Экспериментальная апробация полученных результатов осуществлялась на специально созданном стенде. Стенд состоит из двухканального передатчика, линейного матричного излучателя из 6 антенн, двухканального приемника и двух приемных антенн.

Проведенные на стенде эксперименты можно разделить на следующие основные группы.

1. Измерение углового положения 11 точек, формируемых МИ и имеющих различающиеся частотные сдвиги. Выполнялось для малой, средней и большой баз МИ.

2. Имитация ШК распределенного объекта. Эксперименты проводились на большой матрице. Были выбраны два распределения блестящих точек по поверхности объекта: равномерное (соответствует $\mu=\sqrt{3}$) и две блестящие точки на краях объекта (соответствует $\mu=1$) для:

- размера объекта равного размеру матрицы ($k_y=1$);
- размера объекта вдвое меньше размера матрицы ($k_y=2$), объект расположен по центру МИ ($m_{\text{трёб}}=0$);
- размера объекта вдвое меньше размера матрицы ($k_y=2$), объект расположен у излучателя матрицы ($m_{\text{трёб}}=\pm 0.5$).

Эксперименты пункта 1 обеспечили проверку результатов раздела 2 (точности установки положения КЦИ в различные угловые положения), а эксперименты, проведенные по пункту 2 – раздела 3.

Имитация ШК распределенного объекта

Использовались две модели объекта:

- с равномерным распределением 128 точек, излучающих сигналы одинаковой мощности;
- две точки по краям объекта, излучающих нормально распределенные сигналы с одинаковой дисперсией.

Проведены эксперименты при следующих данных:

- | | |
|---|--|
| 1. $k_y=1, m_{\text{трёб}}=0, \mu=\sqrt{3}$; | 5. $k_y=2, m_{\text{трёб}}=-0.5, \mu=\sqrt{3}$; |
| 2. $k_y=1, m_{\text{трёб}}=0, \mu=1$; | 6. $k_y=2, m_{\text{трёб}}=-0.5, \mu=1$; |
| 3. $k_y=2, m_{\text{трёб}}=0, \mu=\sqrt{3}$; | 7. $k_y=2, m_{\text{трёб}}=0.5, \mu=\sqrt{3}$; |
| 4. $k_y=2, m_{\text{трёб}}=0, \mu=1$; | 8. $k_y=2, m_{\text{трёб}}=0.5, \mu=1$. |

В каждом эксперименте определялось по три параметра ШК: математическое ожидание (m), параметр рассеяния ($\sigma_{\text{изм}}^2$) и коэффициент асимметрии (γ_1):

$$\gamma_1 = \frac{\int_{-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} (\xi - m)^3 W(\xi) d\xi}{\left(\int_{-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} (\xi - m)^2 W(\xi) d\xi \right)^{3/2}}.$$

Результаты измерений приведены в таблице 1 (строки «эксперимент»). Там же для сравнения приведены результаты расчетов по формулам раздела 3 (строки «расчет»).

В каждом эксперименте также определялись два параметра: математическое ожидание ошибки положения объекта (m_χ) и ошибка по параметру рассеяния (χ_{σ^2}). Результаты приведены в таблице 2 (строки «эксперимент»). Для сравнения приведены результаты расчетов по формулам раздела 3 (строки «расчет»).

Таблица 1 – Результаты экспериментов и расчетов

Параметр ПРВ		Номер эксперимента							
		1	2	3	4	5	6	7	8
m	эксперимент	0.0300	0.0100	0.0000	0.0000	-0.5192	-0.4536	0.5210	0.4684
	расчет	0	0	0	0	-0.5437	-0.4991	0.5437	0.4991
$\sigma_{\text{изм}}^2$	эксперимент	0.2810	0.3611	0.1502	0.2421	0.1115	0.2243	0.1318	0.2348
	расчет	0.3859	0.7184	0.1589	0.3242	0.1819	0.3105	0.1819	0.3105
$\sigma_{\text{изм}}$	эксперимент	0.5301	0.6009	0.3876	0.4920	0.3339	0.4736	0.3630	0.4846
	расчет	0.6213	0.8476	0.3987	0.5694	0.4266	0.5573	0.4266	0.5573
γ_1	эксперимент	-0.04	-0.03	0.01	-0.02	1.43	0.90	-1.46	-0.92
	расчет	0	0	0	0	1.35	1.09	-1.35	-1.09

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные результаты ошибок имитации ШК

Параметр		Номер эксперимента							
		1	2	3	4	5	6	7	8
m_χ	эксперимент	0.0300	0.0100	0.0000	0.0000	-0.0192	0.0464	0.0210	-0.0316
	расчет	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0437	0.0009	0.0437	-0.0009
χ_σ^2	эксперимент	-0.5945	-0.7824	-0.1698	-0.2816	-0.1271	-0.1699	-0.1018	-0.1605
	расчет	-0.4328	-0.5890	-0.1657	-0.2112	-0.1404	-0.2344	-0.1404	-0.2344

Моделирование спектральных характеристик ШК

Дополнительно в разделе рассмотрено моделирование спектральных характеристик ШК. В качестве объектов моделирования использовались тестовый объект из 128 точек, расположенных равномерно вдоль горизонтальной линии, а также надводное морское судно.

Для первой модели распределение интенсивности сигналов от точек равномерное. Каждая точка излучает сигнал со случайной амплитудой, которая является компонентом комплексного нормального случайного процесса. Сигналы точек разнесены по частотам на 5 кГц (то есть находятся в диапазоне 5 ГГц $\pm$ 125 кГц).

В качестве надводного судна рассматривался крейсер типа «Тикондерога», основные параметры которого (включая распределение отражающих свойств по поверхности) приведены в открытой литературе. Использована простейшая линейная гармоническая модель качки, для которой угловое отклонение от

положения равновесия изменяется по гармоническому закону:

$$\beta(t) = \beta_{\max} \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T_k} t \right),$$

где β – угол крена, рыскания или угол килевой качки; $\beta_{\max}$ – максимальное отклонение корабля по соответствующему углу; T_k – период колебаний.

Для обеих моделей оценивались плотности распределения и спектральные плотности мощности угловых ШК. Эксперимент на стенде дублировался численным моделированием. Были получены следующие результаты.

Для первой модели оценки плотностей распределения и спектральных плотностей мощностей ШК приведены на рисунках 4 и 5.

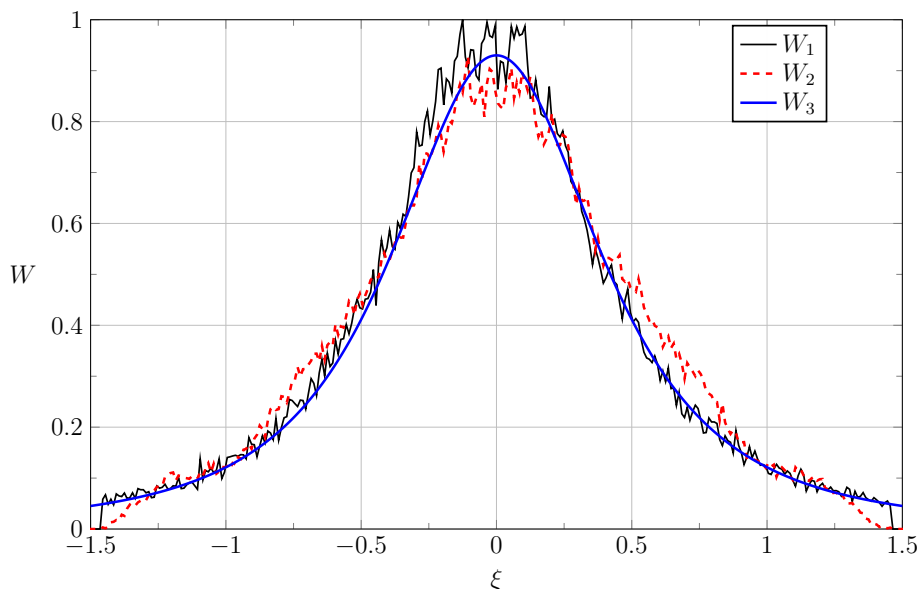


Рисунок 4 – Оценка ПРВ ШК (W_1 – математическое моделирование, W_2 – результаты, полученные на стенде, W_3 – теоретическая кривая)

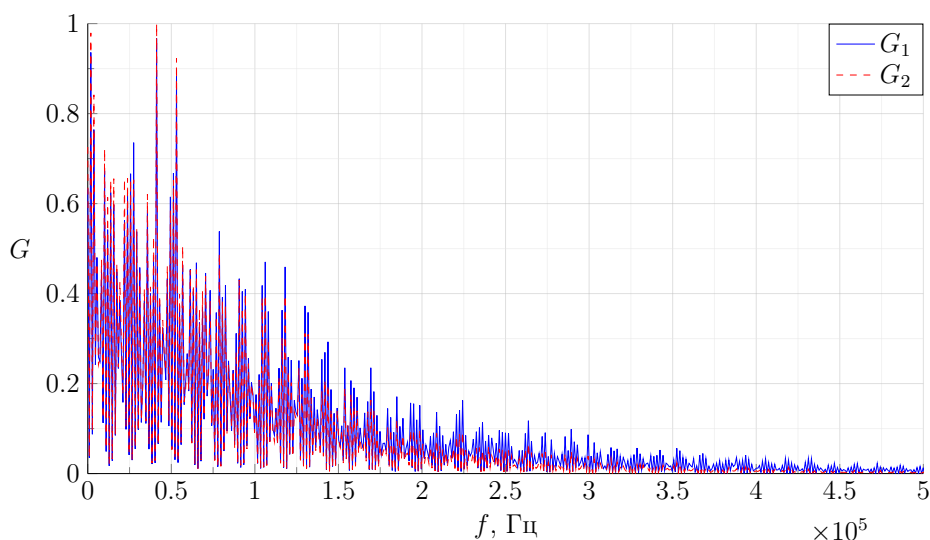


Рисунок 5 – СПМ ШК (G_1 – при математическом моделировании, G_2 – результаты, полученные на стенде)

Для надводного судна оценки приведены на рисунках 6 и 7.

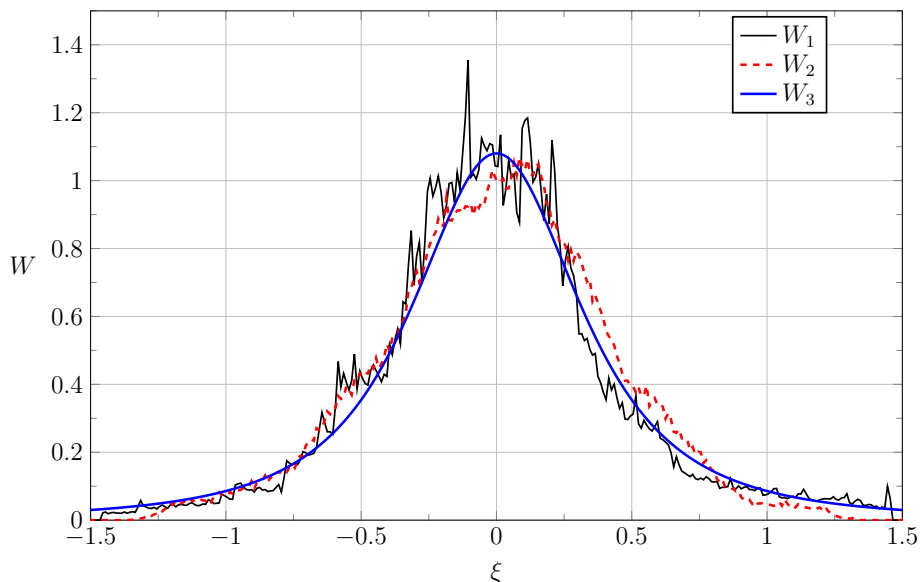


Рисунок 6 – Оценка ПРВ ШК (W_1 – математическое моделирование одномерной модели корабля, W_2 – результаты, полученные на стенде, W_3 – теоретическая кривая)

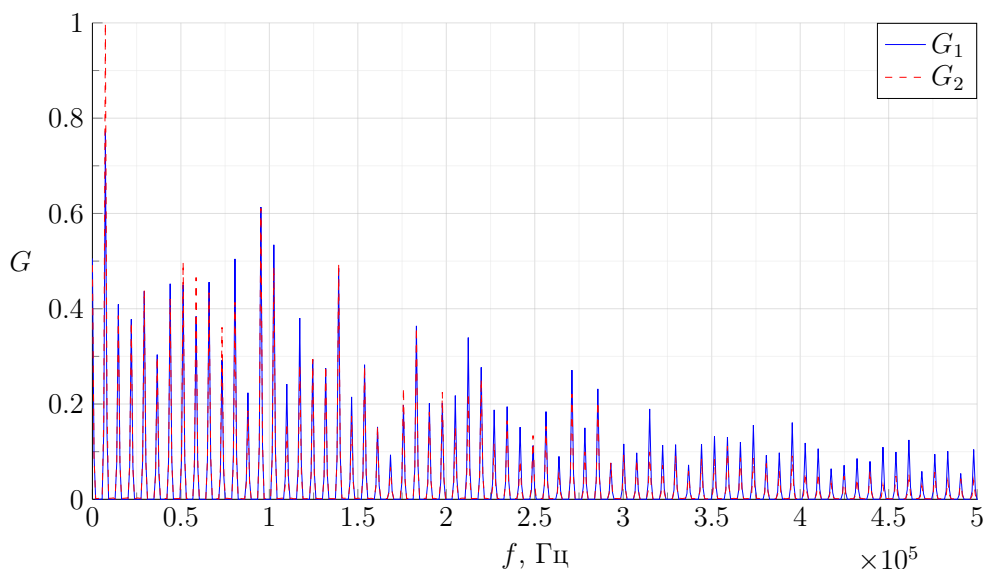


Рисунок 7 – Оценка СПМ ШК (G_1 – при математическом моделировании одномерной модели корабля, G_2 – результаты, полученные на стенде)

Видно хорошее соответствие результатов математического моделирования и экспериментов. Проведенные эксперименты и результаты, полученные для надводного судна, пригодны для практического применения.

В приложении А представлены графические зависимости максимальной ошибки установки КЦИ и места ее возникновения от формы ДН. **В приложении Б** представлены графические зависимости ошибки установки КЦИ от требуемого положения КЦИ внутри матрицы для различных размеров матрицы. **В приложении В** подробно приводится процесс аппроксимации функции ошибки установки КЦИ. **В приложении Г** приведены акты, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы. **В заключении** перечислены основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлены причины возникновения и оценены параметры ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения в матричных имитаторах с учетом направленных свойств антенны радиотехнической системы. Оценены основные вероятностные характеристики ошибок имитации матричным имитатором угловых шумов распределенных объектов: плотность распределения вероятности, первый момент и параметр, определяющий рассеяние. Полученные теоретические результаты развиты до уровня, позволяющего синтезировать матричные имитаторы протяженных радиолокационных объектов, обеспечивающие заданную достоверность имитации их угловых шумов.

Установлено, что представление точечных объектов в виде геометрических моделей, состоящих из двух точек, неизбежно приводит к ошибке при установке углового положения кажущегося центра излучения. Сформулированы зависимости, связывающие величину этой ошибки с диаграммой направленности антенны, разносом излучателей матричного имитатора и заданным положением кажущегося центра излучения.

Установлено, что ошибки установки положения кажущегося центра излучения, возникающие в матричных имитаторах, обуславливают ошибки при моделировании шумов угловых координат распределенных объектов.

Выведены аналитические выражения для оценки ошибки моделирования функции распределения, математического ожидания шумов угловых координат и параметра, характеризующего их разброс. Показано, что эти ошибки зависят от взаимного расположения излучателей матричного имитатора, размеров и положения замещаемого объекта, распределения отражающих свойств по его поверхности и формы диаграммы направленности антенны.

Сформулированы условия и соотношения, позволяющие определить разнос излучателей матричного имитатора и ограничения на размеры и положение замещаемого объекта, при которых обеспечивается заданная достоверность имитации ШК.

Проведена экспериментальная проверка теоретических выводов, подтвердившая их правильность и обоснованность.

Таким образом, следует отметить следующие прикладные аспекты.

1. Полученные выражения для расчета ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения позволяют, во-первых, проводить оценку точностных характеристик матричного имитатора, во-вторых, задавать разнос излучателей матричного имитатора, при котором гарантируется заданный уровень ошибок.

2. Полученные выражения для расчета ошибок установки вероятностных характеристик шумов угловых координат распределенных объектов позволяют задавать разнос излучателей матричного имитатора, определять соотношение между размером разноса и размерами имитируемого объекта, а также устанавливать взаимное положение объекта имитации и матрицы с целью обеспечения заданного гарантированного уровня ошибок.

3. Результаты, полученные при решении задачи синтеза матричного имитатора отражений от надводного корабля, могут быть непосредственно использованы при разработке матричных имитаторов и их программного обеспечения.

В качестве направлений дальнейших исследований логично предложить исследования методов компенсации выявленных ошибок установки углового положения и имитации вероятностных характеристик шумов угловых координат, а также исследования влияния выявленных ошибок на спектральные характеристики шумов угловых координат.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Артюшенко В. В., Киселев А. В., Таюров А. В. Замещение распределенного радиолокационного объекта одноточечной моделью // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2022. – № 1 (54). – С. 14–24.

2. Киселев А. В., Таюров А. В. Систематические ошибки установки углового положения в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2023. – № 4 (61). – С. 34–44.

3. Киселев А. В., Таюров А. В. Соотношения для оценки ошибок установки углового положения в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2024. – № 2 (63). – С. 43–53.

4. Киселев А. В., Таюров А. В. Ошибка установки углового положения радиолокационного объекта, замещаемого двухточечной моделью, при использовании антенн с разностной диаграммой // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2024. – № 4 (65). – С. 15–25.

5. Киселев А. В., Таюров А. В. Математическое ожидание ошибок имитации шумов угловых координат распределенного радиолокационного объекта, замещаемого двухточечной геометрической моделью // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69, № 8. – С. 817–823.

Статьи в журналах, индексируемых в Scopus

6. Киселев А. В., Таюров А. В. Функция распределения шумов угловых координат распределенной цели, замещаемой двухточечной моделью // Информационно-управляющие системы (Information and control systems). – 2025. – № 1. – С. 42–50.

Публикации в материалах конференций

7. Таюров А. В. Использование математической модели для имитации отражений от распределенного объекта / А. В. Таюров, А. В. Киселев // Интеллектуальный потенциал Сибири : сб. науч. тр. 29 регион. науч. студен. конф., посвящ. году науки и технол. в России, Новосибирск, 17–21 мая 2021 г. : в 5 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – Ч. 3. – С. 390–392.

8. Таюров А. В. Моделирование радиолокационных отражений от кораблей / А. В. Таюров, А. В. Киселев // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 23 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–22 апр. 2022 г. : в 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – Т. 2. – С. 343–347.

9. Tayurov A. V. Simulation of Radar Ship Reflections Using Matrix Simulators / A. V. Tayurov, A. V. Kiselev, V. V. Artyushenko. – DOI 10.1109/EDM55285.2022.9855063. – Text : direct // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100th anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyshchinsky : proc., Erlagol, 30 June – 4 July 2022. – Novosibirsk : IEEE, 2022. – P. 124–128.

10. Таюров А. В. Оценка влияния диаграммы направленности антенны на точность определения положения кажущегося центра излучения / А. В. Таюров, А. В. Киселев // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 24 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2023 г. : в 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2023. – Т. 2. – С. 295–300.

11. Tayurov A. V. The average value of the error of setting the angular position of a distributed object when modeling with a matrix simulator / A. V. Tayurov, A. V. Kiselev. – DOI 10.1109/APEIE59731.2023.10347594. – Text : electronic // 16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023) : proc., Novosibirsk, 10–12 Nov. 2023. – IEEE, 2023. – P. 670–674.

12. Tayurov A. V. Errors in setting the angular position in matrix simulators due to the nonlinearity of the direction finding characteristics of the antenna / A. V. Tayurov, A. V. Kiselev. – DOI 10.1109/APEIE59731.2023.10347847. – Text : electronic // 16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023) : proc., Novosibirsk, 10–12 Nov. 2023. – IEEE, 2023. – P. 570–573.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Тел./факс (383)346-08-57
Формат 60×84/16. Объем 1.2 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № Р-04753. Подписано в печать 09.10.2025 г.