

На правах рукописи

УДК 621.396.96



Артюшенко Вадим Валерьевич

ИМИТАЦИЯ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОВЕРХНОСТНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Киселев Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: **Колтышев Евгений Евгеньевич**, доктор технических наук, главный специалист АО «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В.В. Тихомирова» (г. Жуковский)

Шипилов Сергей Эдуардович, кандидат технических наук, доцент федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск)

Защита состоится «4» октября 2017 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д212.268.04 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на официальном сайте организации:

<https://tusur.ru/urls/hkiy78xo>

Автореферат разослан « » июля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.268.04, д.т.н., профессор



Акулиничев Ю.П.

Введение

Актуальность темы

Обязательным этапом разработки современных радиолокационных систем (РЛС) является полунатурное моделирование. При этом широкое применение находят имитаторы эхосигналов. Современный имитатор эхосигналов – это сложный программно-аппаратный комплекс, который позволяет организовать на входе РЛС или отдельных ее узлов совокупность сигналов и помех, соответствующих реальным условиям функционирования. Это позволяет существенно сократить материальные и временные затраты на разработку.

Особый интерес представляют имитаторы, реагирующие в реальном масштабе времени (РМВ) на изменение характеристик испытываемой РЛС и условий эксперимента. Для этого имитатор должен использовать математические модели объектов, требующие минимум ресурсов для вычисления отсчетов имитируемого эхосигнала от них. Разумеется, используемые модели должны также обеспечивать адекватное моделирование эхосигналов.

До недавнего времени при имитации отражений от распределенных объектов ограничивались достоверным моделированием функции распределения мгновенных значений отраженного сигнала, доплеровского спектра, эффектов временного рассеяния и некоторых других наиболее очевидных характеристик. Моделирование этих параметров достаточно хорошо изучено.

Однако свойства отражений от распределенных объектов намного сложнее. Любой реальный распределенный объект представляет собой совокупность большого числа отражающих элементов. Сигналы, отраженные этими элементами, статистически независимы. В точке приема наблюдается интерференция отраженных от них волн. Как известно, разные радиолокационные методы определения угловых координат объектов сводятся, по существу, к определению направления вектора нормали к фазовому фронту отраженной волны в точке приема, в нашем случае – фазовому фронту суммарной волны от точек объекта. При этом вектор нормали указывает на некое мнимое направление, получившее название кажущегося центра из-

лучения (КЦИ). Положение КЦИ флуктуирует в пространстве. Ошибки измерения угловых координат объектов, вызванные этим блужданием, получили название шумов угловых координат (ШК). Практически во всех задачах, связанных с измерением угловых координат объектов, они в большей или меньшей степени есть. Например, при определении угловых координат: самолета на фоне тучи (без использования селекции движущихся целей); наземных объектов; цели в ближнем воздушном бою; определении высоты препятствий в режиме маловысотного полета и во многих других задачах. Вполне очевидно, что при имитации отражений от распределенных объектов следует учитывать это явление. Для описания ШК принято использовать плотность распределения вероятностей (ПРВ) и корреляционную функцию.

В данной работе будем считать модель распределенного объекта адекватной, если она позволяет с заданной точностью моделировать:

1. вероятностные характеристики мгновенных значений эхосигнала;
2. спектрально-корреляционные характеристики эхосигнала;
3. вероятностные характеристики ШК;
4. спектрально-корреляционные характеристики ШК.

С учетом того, что отражения от распределенных объектов оказывают влияние на работу многих радиотехнических устройств, выступая как в качестве помех, так и источников полезной информации, поиск адекватных и экономичных моделей распределенных объектов является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

Традиционно в качестве моделей распределенных объектов используют геометрические модели – совокупность точечных отражателей, распределенных в области пространства, ограниченной размерами объекта (исследователи: Howard D. D., Delano R. H., Pfeffer I., Dunn J. H., Allen P. J., Островитянов Р. В., Басалов Ф. А., Варшавчик М. Л., Губонин Н. С. и др.). Сигналы отражателей являются статистически независимыми. Достоинствами геометрических моделей являются четкая физическая интерпретация и высокая точность моделирования пространственной структуры распределенного объекта. Недостатком – то, что для обеспечения точности

необходимо использовать большое количество отражателей модели (например, для поверхности Земли до $10^3 \div 10^4$ на элемент разрешения), что приводит к большим объемам вычислений и нереализуемости в РМВ.

Логичным решением проблемы является сокращение числа отражателей модели при сохранении уровня точности моделирования вероятностных и спектрально-корреляционных характеристик эхосигнала и шумов угловых координат. Такие модели получили название малоточечных.

При имитации эхосигналов отражатели, представляющие распределенный объект, моделируются с помощью излучателей, к которым подводятся некоррелированные узкополосные нормальные случайные процессы с заданными параметрами. Такие модели получили название некогерентных. Некогерентные модели позволяют добиться блуждания КЦИ аналогичного тому, которое наблюдается при отражении электромагнитной волны от реального распределенного объекта. Некогерентные модели отличаются относительной простотой практической реализации, так как не требуют контроля разности фаз сигналов, подаваемых на излучатели. Известны также модели, для которых сигналы, подаваемые на излучатели, имеют строгое соотношение фаз. Они исследованы, в частности, Бакулевым П. А., Островитяновым Р. В., Джавадовым Г. Г. Такие модели далее рассматриваться не будут.

До настоящего времени исследованы только наиболее простые одномерные некогерентные модели, содержащие несколько излучателей, расположенных в линию. Вместе с тем, очевидны перспективы использования данного подхода для имитации отражений от двумерных распределенных объектов. Решению этого вопроса посвящена настоящая работа.

Цель диссертационной работы – обосновать методы синтеза малоточечных некогерентных моделей двумерных распределенных объектов и разработать полученные результаты до уровня практического применения.

В соответствии с этим были поставлены и решены **следующие основные задачи**.

1. Определены конфигурации двумерных малоточечных геометрических мо-

делей (количество излучателей, их взаимное расположение), обеспечивающие возможность независимого управления ПРВ ШК по двум угловым координатам. Установлены зависимости, связывающие параметры ПРВ ШК с параметрами рассмотренных моделей (координаты излучателей, мощность излучаемых сигналов).

2. Разработан аппарат синтеза двумерных геометрических моделей с заданными параметрами ПРВ и спектрально-корреляционными характеристиками ШК.

3. Полученные результаты развиты до уровня их практического использования и произведена их проверка.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался аппарат теории статистической радиотехники, теории вероятностей и математической статистики, теории радиолокации, статистического и математического моделирования.

Достоверность и обоснованность теоретических результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и подтверждением теоретических выводов положительными результатами апробации и внедрения.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Предложенные двумерные конфигурации некогерентных геометрических моделей позволяют обеспечить независимое по координатам управление параметрами функции распределения шумов угловых координат и ограничиться числом излучателей, не превышающим 9 на элемент разрешения РЛС. Кроме того, при расположении излучателей двумерной модели в виде правильного многоугольника и равной спектральной плотности мощности подводимых к ним сигналов можно синтезировать инвариантную к углу визирования геометрическую модель.

2. Разделимость временной и пространственной переменных в функциях распределения по поверхности объекта плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных компонент эхосигнала позволяет свести задачу моделирования шумов угловых координат к задаче моделирования функции распределения шумов угловых координат с помощью моделей, к излучателям которых подводятся статистически независимые случайные сигналы с коэффициентами корреляции квадратур

как и у эхосигнала от объекта.

3. Адекватное моделирование шумов угловых координат фрагментов, составляющих поверхность распределенного объекта, гарантирует адекватное моделирование шумов угловых координат всего объекта в целом. В частности, при разбиении объекта на фрагменты, выделенные по линиям равных частот, для адекватного моделирования шумов угловых координат достаточно обеспечить требуемые параметры функции распределения шумов угловых координат на каждой частоте спектра имитируемого сигнала.

Научная новизна работы

1. Разработаны конфигурации двумерных геометрических моделей, позволяющие обеспечить независимое управление параметрами распределения ШК по угловым координатам.

2. Определены условия, при которых не требуется изменять конфигурацию геометрической модели поверхностно-распределенного объекта при смене угла визирования.

3. Предложен спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов. Этот подход позволяет по спектральным характеристикам эхосигналов отражателей распределенного объекта рассчитать сигналы излучателей геометрической модели, обеспечивающие достоверную имитацию.

Практическая ценность работы

Полученные результаты применимы при создании комплексов имитации эхосигналов от поверхностно-распределенных объектов.

1. Полученные в работе математические соотношения позволяют по функциям распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов отражателей распределенного объекта синтезировать двумерную геометрическую модель этого объекта, содержащую не более 9 излучателей на элемент разрешения РЛС, что на несколько порядков меньше, чем при традиционном подходе.

2. При расположении излучателей модели в виде правильного многоугольника

и равной мощности их сигналов, можно синтезировать инвариантную к углу визирования геометрическую модель поверхностно-распределенного объекта. Это позволяет при имитации отражений от поверхностно-распределенного объекта экономить вычислительные ресурсы, поскольку не требуется изменять геометрическую конфигурацию модели.

3. Доказано, что разделимость пространственных и временной переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции по поверхности моделируемого объекта позволяет свести имитацию отражений к обеспечению заданных значений параметров распределения ШК. При этом корреляционные функции сигналов отражателей модели с точностью до постоянного множителя совпадают с корреляционными функциями эхосигнала.

4. Разработан обобщенный алгоритм синтеза геометрических моделей поверхностно-распределенного объекта, а также алгоритм имитации эхосигналов на его основе. С использованием разработанных алгоритмов был выполнен синтез моделей неоднородного фрагмента поверхности Земли. Результаты математического моделирования характеристик ШК синтезированных моделей согласуются с теоретическими результатами. Этим подтверждена достоверность разработанных алгоритмов.

Реализация и внедрение результатов исследования

Основные результаты внедрены при выполнении договора с АО «НПО НИИ-ИП – НЗиК». На их основе разработано программное обеспечение имитатора эхосигналов и помех, используемого в составе тренажера радиотехнической системы.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты получены автором лично. Из 13 опубликованных работ 8 написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, результаты, относящиеся к тематике работы, получены автором лично.

Апробация работы

12-я международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения 2014». – Новосибирск, НГТУ, 2–4 октября 2014 г.; 12-th International conference «Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2014)». –

Novosibirsk, NSTU, October 2–4, 2014; Студенческая научная конференция «Дни науки НГТУ-2014», НГТУ, 2014 г.; 16-я международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам. – Алтай, Эрлагол, 29 июня – 3 июля 2015 г.; 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015; XI международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», 25-27 ноября 2015 г., Томск; Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, НГТУ, 01 – 05 декабря 2015 г.; 13-я международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения 2016». – Новосибирск, НГТУ, 3–6 октября 2016 г.; 13-th International conference «Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016)». – Novosibirsk, NSTU, October 3–6, 2016; XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск, НГТУ, 19 – 21 апреля 2017 г.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 13 работ. Из них 6 статей в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; 7 публикаций в трудах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований и одного приложения. Текст диссертации изложен на 156 страницах, содержит 26 рисунков и 4 таблицы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дано краткое содержание работы, а также сформулированы научная новизна и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дан обзор основных свойств и характеристик экосигналов

от распределенных объектов. Сформулированы критерии адекватного моделирования. Проанализированы известные методы моделирования эхосигналов от распределенных объектов. Установлены ограничения, возникающие при использовании известных некогерентных моделей.

При замещении распределенного объекта геометрической моделью имитируемый эхосигнал рассчитывается как результат интерференции сигналов излучателей модели:

$$\dot{i}(t) = \sum_{i,j,k=1}^{I,J,K} A_{i,j,k} \dot{U}_0(t - \tau_{i,j,k}) F_1(\theta_{i,j,k}, \psi_{i,j,k}) F_2(\theta_{i,j,k}, \psi_{i,j,k}) \times \exp(j(\omega_0 + \omega_{i,j,k}) \cdot t + j\varphi_{i,j,k}), \quad (1)$$

где $A_{i,j,k}$, $\omega_{i,j,k}$, $\varphi_{i,j,k}$ – соответственно амплитуда, частота и фаза сигнала излучателя модели с индексом i, j, k ; $\theta_{i,j,k}$, $\psi_{i,j,k}$, $\tau_{i,j,k}$ – положение излучателя модели с индексом i, j, k по азимуту, углу места и задержке соответственно; I, J, K – количество излучателей по соответствующим координатам; $\dot{U}_0(t)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала; ω_0 – несущая частота; $F_1(\theta, \psi)$, $F_2(\theta, \psi)$ – диаграммы направленности передающей и приемной антенн РЛС.

Из (1) видно, что объем вычислений, выполняемых при имитации, пропорционален общему числу излучателей модели. Например, для поверхности Земли – порядка $10^3 \div 10^4$ на элемент разрешения. Естественно, это предъявляет очень высокие требования к вычислительным средствам, особенно это касается моделирования в РМВ. Если же речь идет о создании матричных имитаторов, в которых каждый излучатель моделируется отдельной антенной, то использование такой модели объекта делает его создание чрезвычайно дорогостоящим и трудоемким.

Таким образом, актуален вопрос сокращения числа излучателей модели при сохранении адекватности имитации.

Как известно, ПРВ ШК определяется двумя параметрами: m_γ – математическое ожидание положения КЦИ, μ_γ – параметр, определяющий эффективную «ши-

рину» распределения. Их физический смысл в следующем: m_γ – определяет угловое положение распределенного объекта, а μ_γ^{-1} – его протяженность вдоль координаты γ .

Параметры ПРВ, а также корреляционная функция ШК, могут быть определены, если задано распределение по объему имитируемого объекта плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных компонент сигналов его отражателей $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$:

$$F_r(x_i, y_j, z_k, \tau) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = \langle u_{i,j,k}(t) u_{i,j,k}(t + \tau) \rangle = \langle v_{i,j,k}(t) v_{i,j,k}(t + \tau) \rangle, \quad (2)$$

$$F_s(x_i, y_j, z_k, \tau) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = \langle u_{i,j,k}(t) v_{i,j,k}(t + \tau) \rangle = -\langle v_{i,j,k}(t) u_{i,j,k}(t + \tau) \rangle,$$

где $\langle \rangle$ – усреднение по множеству, u и v – квадратурные компоненты сигнала отражателя с индексом i -, j -, k , $\Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k$ – элементарный объем, выделенный вблизи отражателя с индексом i -, j -, k .

При использовании некогерентных геометрических моделей, на излучатели которых поступают случайные сигналы, возможно моделировать флуктуирующее случайным образом положение КЦИ.

До настоящего времени проанализированы некогерентные модели, содержащие два, три и более излучателей, расположенных в линию. Соответственно, применение таких моделей позволяет осуществлять имитацию отражений только от одномерных объектов (например, объектов, распределенных по азимуту при фиксированном угле места). Вопросы построения двумерных малоточечных некогерентных моделей ранее не рассматривались.

Далее обсуждаются вопросы, связанные с описанием отражающих свойств объектов. Традиционно при описании отражающих свойств распределенных объектов используются такие понятия как тип покрова поверхности объекта, УЭПР, спектрально-корреляционные характеристики доплеровских флуктуаций отраженного сигнала. Однако аппарат синтеза геометрических моделей может быть упрощен, если перейти от описания свойств в традиционных характеристиках к описанию через

характеристики ШК, минуя стадию пересчета. Подобное описание отражающих свойств распределенных объектов ранее не рассматривалось.

При традиционном подходе к процессу имитации отражений от распределенного объекта значительные временные затраты на перерасчет параметров модели требуются при изменении угла визирования объекта. Для сокращения затрат предложено использовать модели, которые обладают инвариантными по отношению к углу визирования свойствами.

Итогом первого раздела является конкретизация задач диссертационной работы.

Во втором разделе обосновываются методы синтеза двумерных некогерентных геометрических моделей, обеспечивающих заданную ПРВ ШК. Доказано, что известные геометрические модели с двумя и тремя излучателями (Рисунок 1) не позволяют независимо обеспечить заданную ПРВ ШК по двум угловым координатам.

Параметры ПРВ ШК для двухточечной модели (Рисунок 1а):

$$m_{\gamma}(\theta) = \frac{L}{2} \cos(\psi - \theta) \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (3)$$

$$\mu_{\gamma}^2(\theta) = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\frac{L^2}{4} \cos^2(\psi - \theta) \left[(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - \frac{[\sigma_1^2 - \sigma_2^2]^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right]},$$

где σ_1^2 , σ_2^2 – мощности сигналов излучателей, углы ψ , θ и расстояние L отмечены на Рисунке 1а.

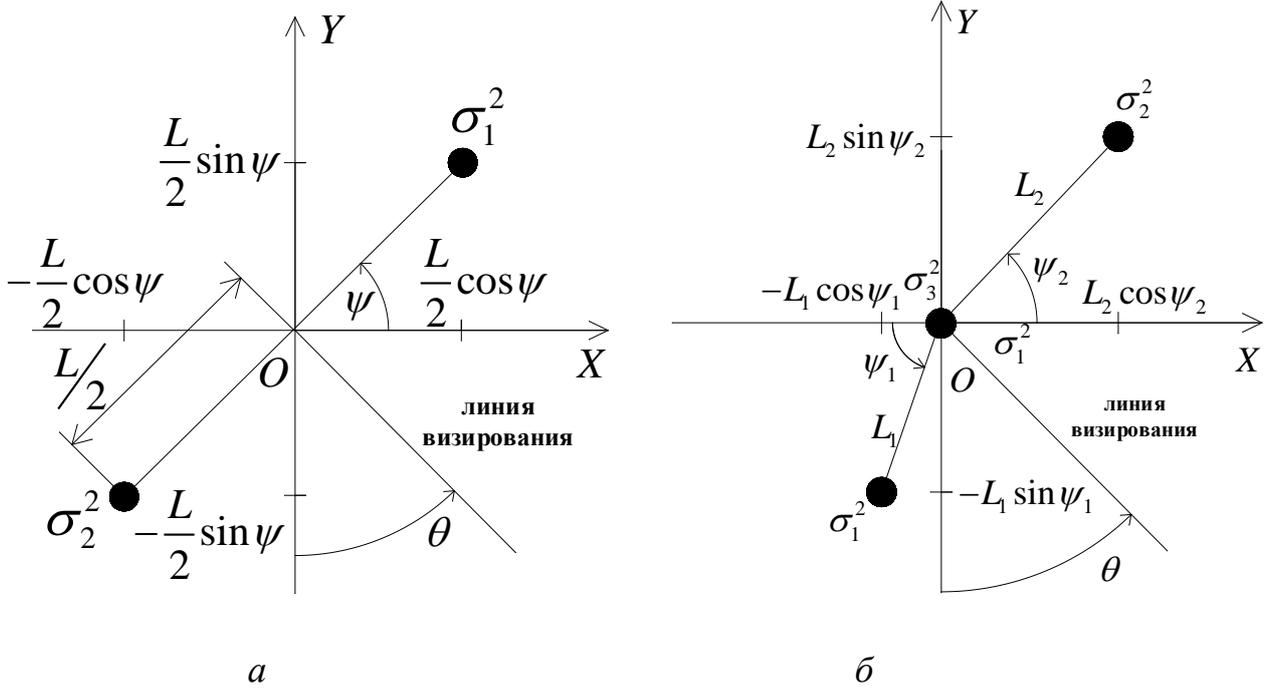


Рисунок 1 – Известные некогерентные модели, содержащие два (а) и три (б) излучателя, расположенные на плоскости

Параметры ПРВ ШК для трехточечной модели (Рисунок 1б):

$$m_\gamma(\theta) = \frac{\sigma_2^2 l_{c2}(\theta) - \sigma_1^2 l_{c1}(\theta)}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}, \quad (4)$$

$$\mu_\gamma^2(\theta) = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{l_{c1}^2(\theta)\sigma_1^2 + l_{c2}^2(\theta)\sigma_2^2 - \frac{(\sigma_2^2 l_{c2}(\theta) - \sigma_1^2 l_{c1}(\theta))^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}},$$

где $l_{c1}(\theta) = L_1 \cos(\psi_1 - \theta)$, $l_{c2}(\theta) = L_2 \cos(\psi_2 - \theta)$, параметры L_1 , L_2 , ψ_1 , ψ_2 обозначены на Рисунке 1б.

Полученные выражения (3) и (4) свидетельствуют о наличии взаимной зависимости параметров ПРВ ШК, относящихся к двум ортогональным направлениям визирования модели. Кроме того, известные модели не позволяют решить задачу обеспечения инвариантной к углу визирования геометрии модели.

Проанализированы свойства моделей, содержащих четыре, пять и девять излучателей, расположенных на плоскости (Рисунок 2).

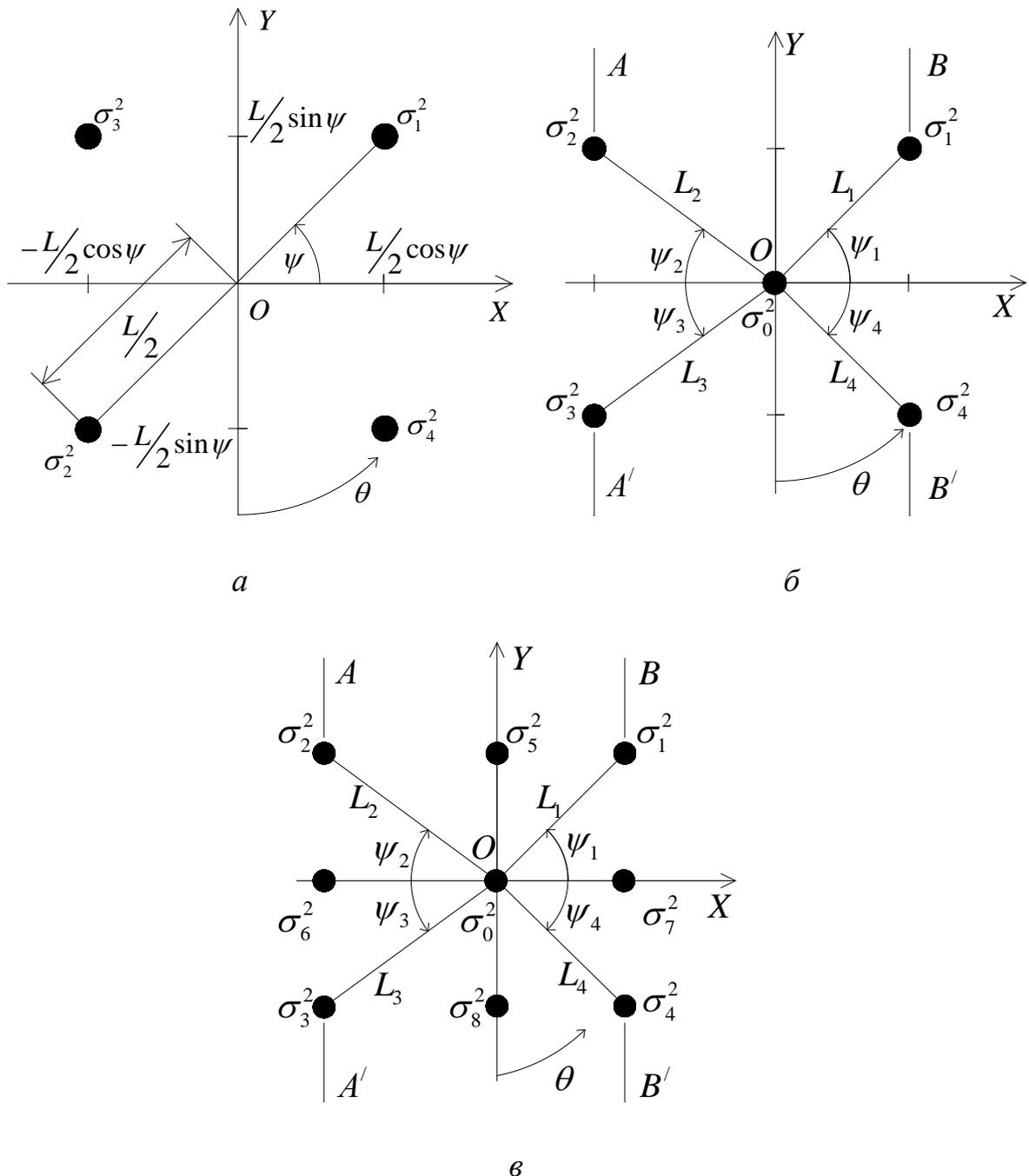


Рисунок 2 – Некогерентные модели, содержащие четыре (а), пять (б) и девять (в) излучателей, расположенных на плоскости

Для приведенных на Рисунке 2 моделей получены аналитические выражения, позволяющие определить $m_\gamma(\theta)$ и $\mu_\gamma(\theta)$ для произвольных параметров модели и угла визирования θ .

Доказано, что рассмотренные модели (Рисунок 2), в отличие от известных ранее, позволяют обеспечить заданную ПРВ ШК относительно двух ортогональных

направлений визирования. Модель Рисунка 2а допускает независимую установку по двум ортогональным осям только одного из параметров распределения ШК (либо μ_γ , либо m_γ). Кроме того, данная модель при визировании вдоль координатных осей сводится к двухточечной, а, следовательно, не позволяет независимо управлять параметрами ПРВ ШК. Модели Рисунка 2б и Рисунка 2в допускают независимую установку обоих параметров распределения ШК по двум угловым координатам. Таким образом, возможно установить положение имитируемого объекта и его угловые размеры, например, по OX , а затем, передвигая линии излучателей AA' и BB' или изменяя соотношение мощностей сигналов излучателей, независимо установить параметры имитируемого объекта вдоль оси OY . Получены аналитические выражения, позволяющие синтезировать такие модели. Если положение излучателей не должно изменяться, из-за равного вклада сигнала центрального излучателя модели Рисунка 2б в параметры ПРВ ШК, относящиеся к разным направлениям визирования, возникает ограничение на границы областей независимого управления этими параметрами. Модель Рисунка 2в позволяет полностью «развязать» параметры ПРВ ШК, относящиеся к двум ортогональным осям координат.

В общем случае, модели Рисунка 2 не обладают инвариантностью геометрии относительно угла визирования. Однако при расположении излучателей в форме квадрата (с центральным излучателем в начале координат для моделей Рисунка 2б и 2в) удается получить инвариантные свойства. При этом мощность сигналов излучателей (за исключением центрального для моделей Рисунка 2б и 2в) должна быть равной.

Для моделей Рисунка 2 получены выражения, позволяющие синтезировать модель с инвариантными к углу визирования свойствами. Получить заданное значение параметров ПРВ ШК можно посредством установки требуемого расстояния между излучателями (длины стороны квадрата), либо, если существует ограничение на размеры модели, устанавливая соотношение между мощностями сигналов центрального излучателя и остальных (для моделей Рисунка 2б и 2в). Для синтеза модели Рисунка 2б с инвариантными к углу визирования свойствами можно использо-

вать выражения:

$$L' = \frac{\sqrt{10}}{\mu_\gamma}, \quad \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2} = \frac{\mu_\gamma^2 (L')^2}{2} - 4, \quad (5)$$

где L' – длина стороны квадрата.

В целом, разработаны структуры двумерных геометрических моделей и получены математические соотношения, позволяющие синтезировать двумерную модель, обеспечивающую заданную ПРВ ШК по двум угловым координатам. Кроме того, получены условия, гарантирующие инвариантность геометрии произвольной N -точечной двумерной конфигурации излучателей к смене угла визирования. Условия сводятся к расположению излучателей модели в виде правильного многоугольника. При этом мощности сигналов, подводимых к излучателям, должны быть равными (за исключением, в некоторых случаях, центрального излучателя).

В третьем разделе результаты второго раздела развиты применительно к обеспечению моделирования спектрально-корреляционных характеристик ШК.

Доказана правомерность применения декомпозиции сложного двумерного распределенного объекта на совокупность фрагментов.

Разобьем двумерный распределённый объект, расположенный в плоскости XOY , на совокупность N фрагментов с площадью поверхности S_i , $i = 1, 2 \dots N$ (Рисунок 3). Алгоритм декомпозиции, форма и размеры поверхности фрагментов в общем случае произвольные. Верно лишь, что для каждого фрагмента геометрическая модель является реализуемой.

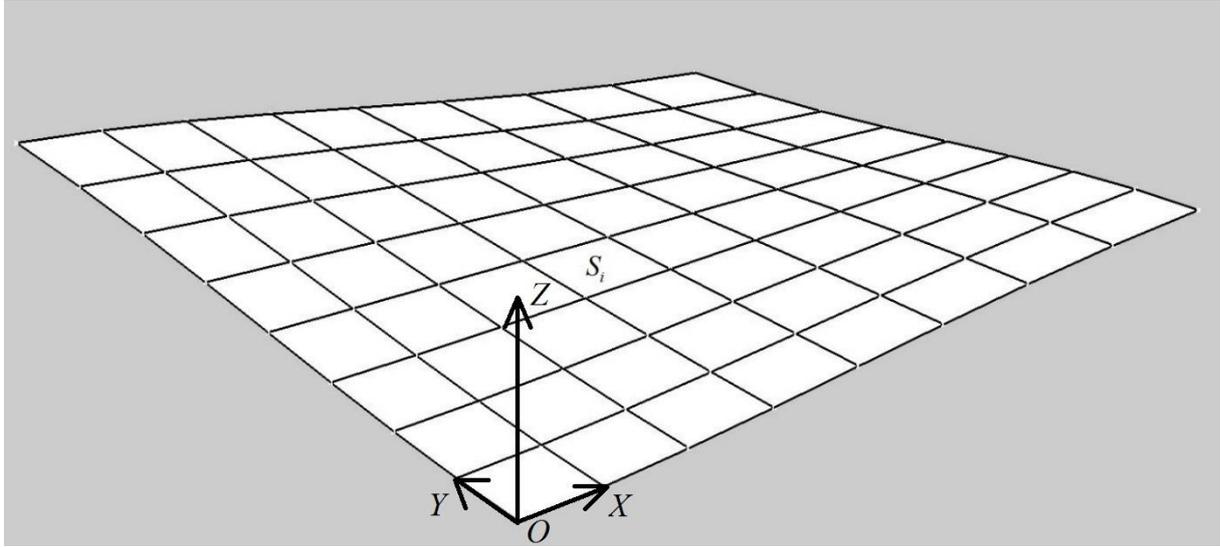


Рисунок 3 – Пример декомпозиции поверхности

Доказано, что при разбиении объекта на части для коэффициентов корреляции квадратурных компонент эхосигнала ($r_H(\tau)$, $s_H(\tau)$, $r_{BH}(\tau)$, $s_{BH}(\tau)$, $r_B(\tau)$, $s_B(\tau)$) выполняются следующие соотношения:

$$r_H(\tau) = \frac{1}{\sigma_H^2} \iiint_{y x z} F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi}^2} \iint_{S_{mi}} F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx, \quad (6)$$

$$s_H(\tau) = \frac{1}{\sigma_H^2} \iiint_{y x z} F_s(y, x, z, \tau) dy dx dz = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi}^2} \iint_{S_{mi}} F_{smi}(y, x, \tau) dy dx,$$

$$\begin{aligned} r_{BH}(\tau) &= \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \iiint_{y x z} (y - m) F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi}} \iint_{S_{mi}} (y - m_{mi}) F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{BH}(\tau) &= \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \iiint_{y x z} (y - m) F_s(y, x, z, \tau) dy dx dz = \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi}} \iint_{S_{mi}} (y - m_{mi}) F_{smi}(y, x, \tau) dy dx, \end{aligned}$$

$$r_B(\tau) = \frac{1}{\sigma_B^2} \iiint_{y x z} (y - m)^2 F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \iint_{S_{mi}} (y - m_{mi})^2 F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx,$$

$$s_B(\tau) = \frac{1}{\sigma_B^2} \iiint_{y x z} (y - m)^2 F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \iint_{S_{mi}} (y - m_{mi})^2 F_{smi}(y, x, \tau) dy dx.$$

В выражениях (6) индексом « m » отмечен параметр, относящийся к геометрической модели фрагмента поверхности, а индексом « i » – параметр, соответствующий i -му фрагменту поверхности или его модели.

Выражения (6) доказывают тот факт, что адекватное моделирование статистических характеристик ШК отдельных фрагментов поверхности гарантирует адекватное моделирование тех же характеристик для всего объекта в целом.

Используя доказанный принцип декомпозиции, предложен спектральный подход к синтезу геометрических моделей двумерных распределенных объектов. Он позволяет по спектральным характеристикам эхосигналов отражателей имитируемого объекта определить спектральную плотность мощности (СПМ) сигналов, которые следует подать на излучатели геометрической модели для обеспечения достоверного моделирования. При этом, по сути, производится декомпозиция объекта на фрагменты, выделенные по линиям равной частоты ω . Каждый такой фрагмент замещается отдельной моделью с заданными $\mu_\gamma(\omega)$ и $m_\gamma(\omega)$.

Отдельно проанализирован случай разделимости пространственных и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ имитируемого объекта, то есть:

$$F_{r_\infty}(x, y, z, \tau) = F_{r_\infty}(x, y, z) r_\infty(\tau), \quad (7)$$

$$F_{s_\infty}(x, y, z, \tau) = F_{s_\infty}(x, y, z) s_\infty(\tau),$$

где $r_\infty(\tau)$ – коэффициент корреляции одноименных квадратурных компонент комплексной огибающей эхосигнала от объекта, $s_\infty(\tau)$ – коэффициент корреляции разноименных квадратурных компонент комплексной огибающей эхосигнала от объекта. Индексом « ∞ » обозначена принадлежность параметра объекту имитации.

Показано, что в этом случае достоверная имитация ШК сводится к обеспечению равенства параметров ПРВ ШК для геометрической модели и имитируемого объекта. При этом к излучателям геометрической модели следует подводить сигнала

лы с корреляционными функциями пропорциональными корреляционным функциям эхосигнала от замещаемого объекта.

В заключении раздела приведена классификация двумерных моделей распределенных объектов. Получены соотношения для определения СПМ сигналов, подводимых к излучателям рассмотренных геометрических моделей, как в случае наличия разделимости переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ объекта, так и при ее отсутствии.

В целом разработан математический аппарат, позволяющий синтезировать двумерную геометрическую модель, обладающую как заданной ПРВ ШК, так и заданными спектрально-корреляционными характеристиками ШК.

В четвертом разделе полученные результаты развиты до уровня их практического использования. Сформулированы обобщенные алгоритмы синтеза двумерных геометрических моделей и имитации отраженных сигналов на их основе.

Обобщенный алгоритм апробирован применительно к имитации эхосигналов от типового распределенного объекта – поверхности Земли. В качестве исходных данных использована цифровая топографическая карта местности с заданными значениями УЭПР и ширины спектра доплеровских флуктуаций отдельных покровов поверхности. На их основе синтезируются геометрические модели и рассчитываются отсчеты эхосигналов.

На основе обобщенного алгоритма имитации разработано программное обеспечение имитатора эхосигналов и помех, используемого в составе тренажера радиотехнической системы. Программное обеспечение позволяет по цифровой карте поверхности и дополнительным параметрам моделируемой ситуации синтезировать совокупность замещающих двумерных моделей и вычислить отсчеты имитируемого эхосигнала. Анализ ПРВ и спектрально-корреляционных характеристик формируемых сигналов и ШК свидетельствует о высокой точности совпадения исследуемых характеристик. Таким образом, подтверждена справедливость полученных теоретических результатов.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Основные результаты работы

В диссертационной работе решены задачи, относящиеся к имитации радиолокационных эхосигналов от двумерных распределенных объектов.

1. Определены структуры и получены соотношения для синтеза двумерных геометрических моделей, обеспечивающих независимое управление параметрами ШК по двум угловым координатам.

2. Показано, что при расположении излучателей геометрической модели в виде правильного многоугольника и равной спектральной плотности мощности подводимых к ним сигналов можно обеспечить устойчивость конфигурации модели к изменению угла визирования.

3. Разработан спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов. Данный подход позволяет по спектральным характеристикам эхосигналов от точек моделируемого распределенного объекта определить СПМ сигналов излучателей геометрической модели, обеспечивающих достоверную имитацию.

Теоретические результаты работы доведены до практического применения и имеют прикладное значение.

1. Разработанный математический аппарат позволяет по функциям распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов отражателей распределенного объекта синтезировать двумерную геометрическую модель этого объекта, содержащую не более 9 излучателей на элемент разрешения РЛС, что на несколько порядков меньше, чем при традиционном подходе.

2. Показано, что при делимости пространственных и временной переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции по поверхности моделируемого объекта имитация отражений сводится к обеспечению заданных значений параметров распределения ШК. При этом корреляционные функции сигналов излучателей модели с точностью до постоянного множителя сов-

падают с корреляционными функциями эхосигнала от объекта.

3. Разработан обобщенный алгоритм синтеза геометрических моделей поверхностно-распределенного объекта, а также алгоритм имитации эхосигналов на его основе.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России

1. Артюшенко В. В., Киселев А.В. Геометрическая модель двумерных отражающих объектов // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. Сер. Общетеchnическая (ОТ). - Вып. 3. – С. 44-51.

2. Артюшенко В. В. Задание отражающих свойств распределенных объектов в терминах шумов координат / В. В. Артюшенко, А. В. Киселев, М. А. Степанов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2015. – № 3. – С. 17–28. – DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-17-28.

3. Артюшенко В. В. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат распределенных объектов / В. В. Артюшенко, А. В. Киселев, М. А. Степанов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2015. – № 4 (29). – С. 19–27. – DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-19-27.

4. Артюшенко В. В. Геометрические модели поверхностно-распределенных объектов/ В. В. Артюшенко, А. В. Киселев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2016. – № 4. – С. 6–11.

5. Артюшенко В. В. Алгоритм имитации отражений от земной поверхности на основе использования моделей, инвариантных к углу наблюдения/ В. В. Артюшенко, А. В. Никулин // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 6–10.

6. Артюшенко В. В. Алгоритм расчета энергетических параметров отраженных сигналов по цифровой карте местности / В. В. Артюшенко, А. В. Никулин // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 11–15.

Публикации в материалах конференций и других изданиях

7. Артюшенко В. В. Использование графических процессов для имитации радиолокационных эхосигналов от поверхности Земли / В. В. Артюшенко, А. В. Кисе-

лев, С. В. Тырыкин // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 4. – С. 37-39.

8. Artyushenko V. V. The geometric model of two-dimensional reflective objects / V. V. Artyushenko, A. V. Kiselev // 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [proc.], Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – IEEE, 2015. – P. 107-109. - ISBN 978-1-4673-6718-9. - DOI: 10.1109/EDM.2015.7184500.

9. Артюшенко В.В. Задание отражающих свойств распределенных объектов через параметры распределения шумов координат / Материалы докладов XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», 25-27 ноября 2015 г., Томск: в 2-х частях. – Томск: В-Спектр, 2015. – Часть 1. – С. 9-13.

10. Артюшенко В.В. Математическое моделирование статистических характеристик шумов координат геометрической модели распределенного объекта / Материалы докладов XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», 25-27 ноября 2015 г., Томск: в 2-х частях. – Томск: В-Спектр, 2015. – Часть 1. – С. 13-17.

11. Артюшенко В.В. Моделирование спектрально-корреляционных характеристик флуктуаций электромагнитных полей, отраженных от распределенных объектов / Сборник научных трудов конференции «Наука. Технологии. Инновации», 01-05 декабря 2015 г., Новосибирск: в 9 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Часть 6. – С. 13-14.

12. Артюшенко В. В. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат // Актуальные вопросы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 12. – С. 60-63.

13. Артюшенко В. В. Условия инвариантности параметров шумов координат геометрической модели к углу визирования / Сборник научных трудов XVIII

Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», 19-21 апреля 2017 г., Новосибирск: в 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Том 2. – С. 234-238.