

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Никулин Андрей Викторович

**Имитация отражений радиосигналов на основе использования
дискретных излучателей статистически независимых сигналов**

Специальность: 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Киселев Алексей Васильевич

Официальные оппоненты:

Акулиничев Юрий Павлович

доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры радиотехнических систем.

Фалько Анатолий Иванович

доктор технических наук, профессор федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», профессор кафедры радиотехнических устройств.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»

Защита состоится 2 июня 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.212.173.08 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ по адресу:
630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20 и на сайте НГТУ:
<http://www.nstu.ru>

Автореферат разослан _____ 31.03. 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

к.т.н., доцент



Вихман В.В.

Введение

Актуальность темы

В задачах испытания радиотехнических средств (РТС) широкое распространение получило полунатурное моделирование. Основной причиной этого явилось желание удешевить процесс создания и отладки РТС, поскольку натурные эксперименты связаны с большими материальными затратами и не всегда целесообразны. Для только создаваемой системы провести эксперимент попросту невозможно. Полунатурное моделирование позволяет в лабораторных условиях воспроизвести условия натурального эксперимента.

Если требуется оценить работу всех узлов системы, включая её пространственно-селективные свойства, определяемые антенной системой, возникает необходимость имитации отражений от объекта на апертуре приёмной антенны РТС. Для этого используют имитаторы эхосигналов.

Такие имитаторы, как правило, решают две задачи. Первая – формирование сигналов и помех, соответствующих моделируемой радиоэлектронной обстановке. Вторая – их преобразование в электромагнитные поля на апертуре антенны исследуемого устройства.

Первая задача в настоящее время во многом решена. Наибольшую сложность и интерес представляет решение второй задачи. Известен ряд решений, имеющих ограниченные возможности.

При этом, как правило, сигналы и помехи преобразуются в электромагнитные поля с помощью антенн, размещаемых в дальней зоне антенны испытуемого устройства. Антенны имитатора могут быть как неподвижными, так и подвижными, моделирующими перемещение источников излучения или отражения сигналов.

Основные недостатки этого решения заключаются в том, что, во-первых, оно не позволяет моделировать отражения от распределенных объектов, а, во-вторых, механическое перемещение излучающих антенн накладывает ограничения на характер и параметры этих перемещений.

Перспективным решением задач имитации электромагнитных полей является применение так называемых матричных имитаторов (далее МИ). Они представляют собой систему неподвижных излучателей, расположенных в дальней зоне антенны испытываемого устройства. Известен способ, позволяющий, используя два излучателя (двухточечную модель), изменять положение кажущегося центра излучения (КЦИ), который характеризует направление, с которого как бы поступает электромагнитная волна. Исследованием двухточечных моделей в разное время занимались: Островитянов Р.В., Басалов Ф.А., Зубкович С.Г., Beard С., Delano R. и др.

Двухточечные модели можно поделить на модели с когерентными сигналами (разность фаз сигналов постоянна во времени) и на модели с некогерентными сигналами (сигналы представляют собой статистически независимые флуктуации), поступающими на излучатели.

Модель с когерентными сигналами позволяет управлять положением КЦИ путём перераспределения мощностей и изменения соотношения фаз сигналов на излучателях. Однако добиться устойчивого соотношения между фазами сигналов сложно. Например, в условиях дальней зоны для антенны с апертурой порядка одного метра в сантиметровом диапазоне необходимо при расстоянии от антенны до излучающей части модели около семидесяти метров обеспечить точность установки излучателей порядка трех миллиметров.

Модель с некогерентными сигналами позволяет управлять среднестатистическим положением блуждающего кажущегося центра излучения путем перераспределения мощностей случайных сигналов на излучателях. Так как сигналы некогерентные, то исключается необходимость поддерживать постоянные соотношения фаз сигналов. Аналогичные блуждания имеют место при отражении радиосигналов от распределенных объектов. Антенна РТС определяет направление прихода сигнала как направление, противоположное нормали к фазовому фронту волны отраженного сигнала. Протяженность объекта приводит к тому, что фазовый фронт отличается от сферического. Поэтому нормаль к фазовому фронту в точке наблюдения укажет не на действительный

центр излучения, а на некий флуктуирующий КЦИ. Это явление получило название шумов координат (ШК). Исследованием ШК занимались такие ученые как: Howard D.D., Delano R. H., Pfeffer I., Dunn J.H., Allen P. J., Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Традиционно свойства ШК описываются плотностью распределения вероятностей (ПРВ) флуктуаций положения КЦИ возле своего среднестатистического значения и спектрально-корреляционными характеристиками. ПРВ ШК характеризуется своими параметрами: m_γ – математическое ожидание положения КЦИ и μ – параметр, определяющий ширину ПРВ ШК.

Несмотря на перспективность использования некогерентных моделей в задачах имитации отражений от распределенных объектов с учетом их шумов координат, к настоящему времени этот вопрос остался нерешенным. Решению этого вопроса посвящена настоящая работа.

Цель работы: обосновать возможность имитации отражений от распределенных объектов с учетом их шумов координат, используя модель, составленную из излучателей, на которые подаются некогерентные сигналы.

Для достижения этой цели решены следующие **основные задачи:**

1. Показано, что некогерентная двухточечная модель позволяет имитировать отражения от распределенных объектов с учетом их шумов координат. При этом параметры ПРВ ШК связаны между собой.
2. Установлена связь количества излучателей некогерентной модели с возможностью независимого управления параметрами ПРВ ШК (m_γ и μ).
3. Получены соотношения для определения границ диапазона независимого управления параметрами ПРВ ШК для моделей с числом излучателей большим, чем два.
4. Определены свойства сигналов, поступающих на излучатели модели, и положение этих излучателей, необходимые для получения заданных ПРВ ШК и спектрально-корреляционных характеристик ШК.

5. Найдены ограничения, накладываемые на спектрально-корреляционные и геометрические свойства объектов моделирования, при использовании двухточечной и трехточечной модели.

6. Разработаны рекомендации по синтезу двухточечных и трехточечных моделей, позволяющих имитировать отражения от распределенных объектов с учетом их шумов координат.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы: методы статистической радиотехники, математической статистики, математического анализа и теория радиотехники.

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

Положения, выносимые на защиту

1. Некогерентная модель, состоящая из трех и более излучателей, позволяет независимо управлять параметрами ПРВ ШК, а именно математическим ожиданием положения КЦИ (m_{γ}) и параметром, определяющим ширину ПРВ ШК μ . Диапазон, в котором возможно независимое управление параметрами ПРВ ШК, определяется расстоянием между излучателями и их количеством.

2. Неэквидистантная трехточечная модель с изменяемым набором активных излучателей позволяет управлять параметрами ПРВ ШК в тех же пределах, что и модель, состоящая из большего количества (N) излучателей, в ограниченной области. Требуется изменить набор активных излучателей для управления параметрами ПРВ ШК в другой области.

3. Не для всякого имитируемого объекта возможен синтез моделей, обеспечивающих требуемые спектрально-корреляционные характеристики ШК. Синтез возможен в случае делимости пространственной и временной переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих эхосигналов.

Научная новизна работы

1. Установлена связь между количеством и расположением излучателей модели с диапазоном, в котором можно независимо управлять параметрами ПРВ ШК, такими как математическое ожидание положения КЦИ (m_γ) и параметром, определяющим ширину ПРВ ШК (μ).

2. Найдены условия, при выполнении которых двухточечная модель может достоверно воспроизводить спектрально-корреляционные характеристики ШК распределенного объекта.

3. Определены возможности трёхточечной модели по имитации отражений от распределенного объекта с учетом ПРВ ШК и их спектрально-корреляционных характеристик.

Практическая ценность работы

Полученные результаты применимы при создании матричных имитаторов эхосигналов.

1. Получены соотношения, определяющие возможность замещения распределенного объекта трехточечной или двухточечной моделью.

2. Получены аналитические выражения, позволяющие по угловым размерам объекта рассчитать параметры ПРВ ШК (μ и m_γ), по которым можно определить мощности сигналов, поступающих на излучатели трехточечной модели и расстояние между ними.

3. Получены соотношения, позволяющие по корреляционным характеристикам эхосигнала от объекта определить корреляционные характеристики сигналов, поступающих на излучатели матричного имитатора.

4. Установлено, что в случае разделимости пространственной и временной переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих эхосигналов отражателей объекта для имитации отражений с учетом ШК достаточно обеспечить равенство ПРВ ШК для модели и замещаемого объекта. При этом к излучателям модели

следует подводить сигналы с коэффициентами корреляции, аналогичными коэффициентам корреляции эхосигнала от замещаемого объекта.

5. На основании полученных теоретических результатов сформулированы рекомендации по синтезу матричных имитаторов отражений от распределенных объектов.

Внедрение результатов работы. Основные результаты внедрены при выполнении договора с ОАО «НТЦ «Завод Ленинец». На их основе был разработан матричный имитатор эхосигналов, используемый для отработки перспективных радиотехнических средств.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты получены автором лично. Из 23 опубликованных работ 11 написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, результаты, относящиеся к тематике работы, получены автором.

Апробация работы

Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, НГТУ, 3–5 декабря 2010 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» Новосибирск, НГТУ, 20–22 апреля 2011 г.; Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, НГТУ, 2–4 декабря 2011 г.; Студенческая научная конференция «Дни науки НГТУ-2011», НГТУ, 2011 г.; Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2011 г.; 11-я международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения 2012». – Новосибирск, НГТУ, 2–4 октября 2012 г.; Новосибирская межвузовская научная студенческая конференция «Интеллектуальный потенциал Сибири» – Новосибирск, НГТУ, 23–24 мая 2012 г.; Студенческая научная конференция «Дни науки НГТУ-2012», НГТУ, 2012 г.; Студенческая научная конференция «Дни науки НГТУ-2012», НГТУ, 2012 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» Новосибирск, НГТУ, 12–20 апреля 2012 г.; Все-

российская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, НГТУ, 29 ноября –2 декабря 2012 г.; Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2013 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» Новосибирск, НГТУ, 24–26 апреля 2013 г.; Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, НГТУ, 21 – 24 ноября 2013 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» Новосибирск, НГТУ, 23–25 апреля 2014 г.; 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; Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, НГТУ, 02 – 06 декабря 2014 г.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 23 работы. Из них 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; 17 публикаций в трудах всероссийских и международных конференций; 3 депонированные рукописи.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования и трёх приложений. Текст диссертации изложен на 149 страницах, содержит 1 таблицу и 43 рисунка.

Содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности диссертационной работы, её цель и задачи, краткое содержание, а также описание научной новизны и практической значимости работы.

В первом разделе рассмотрены особенности когерентных и некогерентных моделей и МИ, созданных на их основе. Проведено сравнение их возможностей для моделирования отражений от распределённых объектов. Рассмотрено

ны основные характеристики шумов координат. Установлены ограничения, возникающие при использовании двухточечной модели.

Как известно, плотность распределения вероятности шумов координат определяется законом распределения Стьюдента с двумя степенями свободы:

$$W(\gamma) = \mu / (2 \cdot (1 + \mu^2 \cdot (\gamma - m_\gamma)^2)^{3/2}), \quad (1)$$

где γ – обобщенная координата КЦИ; $m_\gamma = \int_\gamma \gamma F_r(\gamma) d\gamma / \int_\gamma F_r(\gamma) d\gamma$ – математическое ожидание положения КЦИ (зависит от положения объекта); $F_r(\gamma)$ – функция, описывающая распределение плотности интенсивности отражений от объекта вдоль координаты γ (область интегрирования по γ , здесь и далее ограничена отражающей поверхностью или объемом моделируемого объекта); μ – параметр распределения, от которого зависит ширина ПРВ и угловые размеры объекта.

Использование некогерентных моделей, на излучатели которых поступают случайные сигналы, позволяет моделировать флуктуирующее случайным образом положение КЦИ. ПРВ этих флуктуаций КЦИ повторяет (1). Это позволяет говорить о том, что МИ, в основе которых лежат некогерентные модели, потенциально позволяют моделировать отражения от распределенных объектов или их фрагментов.

При этом m_γ и μ зависят от расстояния между излучателями (здесь и далее это расстояние нормировано) и мощностей сигналов (P_1, P_2), подводимых к ним:

$$m_\gamma = (P_2 - P_1) / (P_2 + P_1); \quad (2)$$

$$\mu = 1 / \sqrt{1 - \left(\frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1} \right)^2}. \quad (3)$$

Критерием, при выполнении которого можно говорить о том, что модель с некогерентными сигналами адекватно имитирует отражения от распределенных объектов с учетом ШК, является достоверное моделирование ПРВ ШК и их спектрально-корреляционных характеристик.

С учетом этого критерия рассмотрены возможности двухточечной некогерентной модели при моделировании ШК.

Из (2) и (3) получена зависимость $\mu(m_\gamma)$:

$$\mu(m_\gamma) = 1/\sqrt{1-m_\gamma^2} . \quad (4)$$

На Рисунке 1 изображен график зависимости $\mu(m_\gamma)$. Из Рисунка 1 и выражения (4) видно, что двухточечная модель не позволяет независимо друг от друга управлять параметрами ПРВ ШК.

Взаимосвязь параметров ПРВ ШК приводит к ситуации, когда угловые размеры объекта определяются его положением.

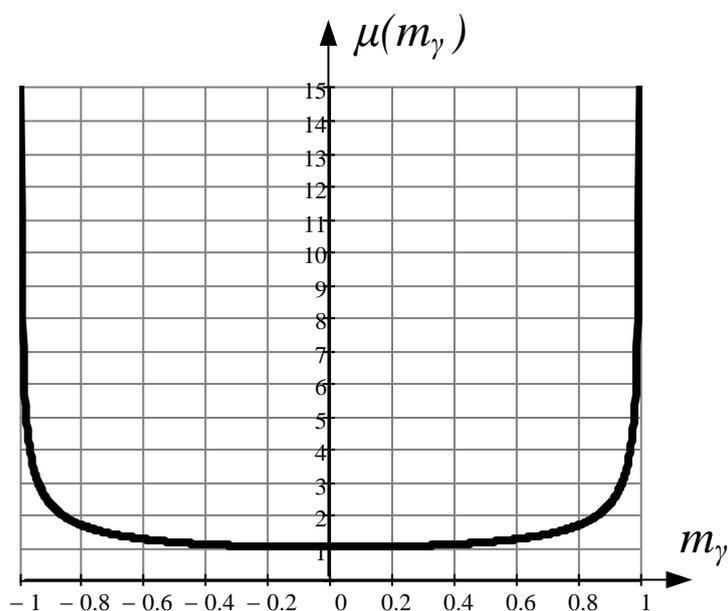


Рисунок 1 – Связь параметров распределения ШК

Для расширения возможностей двухточечной некогерентной модели предложено использовать модели с большим числом излучателей.

Итогом первого раздела является конкретизация задач диссертационной работы.

Второй раздел посвящен анализу связи количества излучателей некогерентной модели с возможностью независимого управления параметрами распределения ШК. Последовательно проанализированы некогерентные модели с тремя, четырьмя и шестью излучателями. Получены обобщенные выражения

для моделей с N -м количеством излучателей и сделаны выводы о минимальном количестве излучателей, необходимом для формирования независимых параметров распределения ПРВ ШК. Предложено имитировать отражения от распределенного объекта при помощи неэквидистантной трехточечной модели (модели с изменяемым положением излучателей).

Для неэквидистантной трехточечной модели функция, описывающая распределение плотности интенсивности отражений от объекта вдоль γ :

$$F_r(\gamma) = \begin{cases} P_1 \delta(\gamma + \gamma_1); & -1 \leq \gamma_1 \leq 1; \\ P_2 \delta(\gamma + \gamma_2); & -1 \leq \gamma_2 \leq 1; \\ P_3 \delta(\gamma + \gamma_3), & -1 \leq \gamma_3 \leq 1, \end{cases}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – нормированные расстояния от начала координат до излучателей (координаты излучателей); P_1, P_2, P_3 – мощности сигналов на соответствующем излучателе; $\delta()$ – дельта-функция.

Математическое ожидание положения КЦИ неэквидистантной трехточечной модели m_γ :

$$m_\gamma(v_1, v_2) = \int_\gamma \gamma F_r(\gamma) d\gamma / \int_\gamma F_r(\gamma) d\gamma = \frac{\gamma_1 v_1^2 + \gamma_2 v_2^2 + \gamma_3}{v_1^2 + v_2^2 + 1},$$

где v_1^2 и v_2^2 – отношения мощностей сигналов, поступающих на излучатели модели $v_1 = \sqrt{P_1/P_3}$ и $v_2 = \sqrt{P_2/P_3}$.

Параметр ПРВ ШК μ :

$$\mu(v_1, v_2) = \frac{\sigma_H}{\sigma_B} = 1 / \sqrt{\frac{\gamma_1^2 v_1^2 + \gamma_2^2 v_2^2 + \gamma_3^2}{v_1^2 + v_2^2 + 1} - \left[\frac{\gamma_1 v_1^2 + \gamma_2 v_2^2 + \gamma_3}{v_1^2 + v_2^2 + 1} \right]^2}, \quad (5)$$

где $\sigma_H^2 = \int_\gamma F_r(\gamma) d\gamma$, $\sigma_B^2 = \int_\gamma (\gamma - m_\gamma)^2 F_r(\gamma) d\gamma$.

В отличие от двухточечной модели, трехточечная позволяет независимо управлять параметрами ПРВ ШК в ограниченном диапазоне. Были получены выражения, определяющие границы диапазона, в котором можно независимо управлять параметрами распределения:

$$\mu_1 = 1/\sqrt{-(m_\gamma - \gamma_3)(m_\gamma + \gamma_1)}; \quad (6)$$

$$\mu_2 = 1/\sqrt{-(m_\gamma - \gamma_2)(m_\gamma + \gamma_1)}; \quad (7)$$

$$\mu_3 = 1/\sqrt{-(m_\gamma - \gamma_3)(m_\gamma + \gamma_2)}. \quad (8)$$

В зависимости от положения излучателей $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, (6)-(8) могут определять как нижнюю, так и верхнюю границы диапазона независимого управления параметрами ПРВ ШК.

В качестве примера на Рисунке 2 показаны графики зависимости минимального и максимальных значений параметра μ от m_γ для трехточечной неэквидистантной модели.

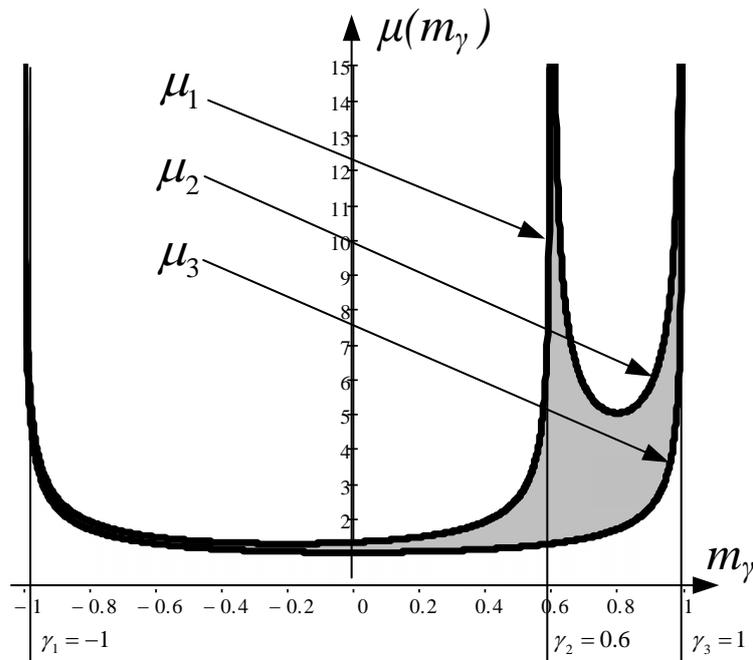


Рисунок 2 – Границы диапазона (сплошная черная линия) и диапазон (закрашен серым цветом), в котором возможно независимое управление параметрами ПРВ ШК для неэквидистантной трехточечной модели

По известным параметрам ПРВ ШК найдены мощности сигналов P_1, P_2 и P_3 , необходимые для их обеспечения:

$$\begin{aligned}
P_1 &= \frac{\sigma_B^2 + \sigma_H^2 m_\gamma^2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_3 + \sigma_H^2 \gamma_2 \gamma_3}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}; \\
P_2 &= -\frac{\sigma_B^2 + \sigma_H^2 m_\gamma^2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_1 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_3 + \sigma_H^2 \gamma_1 \gamma_3}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}; \\
P_3 &= \frac{\sigma_B^2 + \sigma_H^2 m_\gamma^2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_1 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_2 + \sigma_H^2 \gamma_1 \gamma_2}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)}.
\end{aligned} \tag{9}$$

В разделе показано, что неэквидистантная модель, состоящая из трех излучателей, может обеспечивать параметры распределения ШК, соответствующие параметрам N -точечной модели. Для этого из матрицы N излучателей необходимо выбрать и активировать три излучателя.

В приложении к диссертационной работе приведен алгоритм, позволяющий по угловым размерам объекта определить параметры ПРВ ШК, а по ним – какие излучатели необходимо активировать, и какие мощности (P_1 , P_2 , P_3) сигналов подавать на них.

Третий раздел посвящен исследованию возможностей моделирования спектрально-корреляционных характеристик ШК при помощи двух и трехточечных моделей. Установлены условия, при которых двухточечная и трехточечная модель может достоверно воспроизводить спектрально-корреляционные характеристики ШК. Получены выражения, позволяющие рассчитать собственные и взаимные корреляционные функции квадратур сигналов, поступающих на излучатели.

Установлено, что двухточечная модель может воспроизводить спектрально-корреляционные характеристики ШК, если выполняются соотношения:

$$\begin{aligned}
\int_{\gamma} F_r(\gamma, \tau) \left(1/\sigma_H^2 + a_r 1/\sigma_B^2 (\gamma - m_\gamma)^2 + b_r 1/\sigma_B \sigma_H (\gamma - m_\gamma) \right) d\gamma &= 0; \\
\int_{\gamma} F_s(\gamma, \tau) \left(1/\sigma_H^2 + a_r 1/\sigma_B^2 (\gamma - m_\gamma)^2 + b_r 1/\sigma_B \sigma_H (\gamma - m_\gamma) \right) d\gamma &= 0,
\end{aligned} \tag{10}$$

где $a_r = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_H^2 (\gamma_2 \gamma_1 - \gamma_2 m_\gamma + m_\gamma^2 - \gamma_1 m_\gamma)}$, $b_r = \frac{\sigma_B (2m_\gamma - \gamma_2 - \gamma_1)}{\sigma_H (\gamma_2 \gamma_1 - \gamma_2 m_\gamma + m_\gamma^2 - \gamma_1 m_\gamma)}$, а

$$F_r(\gamma_i, \tau) \Delta \gamma_i = \langle u_i(\gamma_i, t) (u_i(\gamma_i, t + \tau)) \rangle = \langle v_i(\gamma_i, t) (v_i(\gamma_i, t + \tau)) \rangle \quad \text{и}$$

$F_s(\gamma_i, \tau)\Delta\gamma_i = \langle u_i(\gamma_i, t)(v_i(\gamma_i, t + \tau)) \rangle = -\langle v_i(\gamma_i, t)(u_i(\gamma_i, t + \tau)) \rangle$ – соответственно функции распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих эхосигналов вдоль обобщенной координаты γ ($F_r(\gamma, \tau = 0) = F_r(\gamma)$, $F_s(\gamma, \tau = 0) = 0$); $\langle \rangle$ – усреднение по множеству; v_i и u_i – квадратурные компоненты сигнала i -й точки с координатой γ_i .

Для трехточечной модели получены выражения, позволяющие рассчитать корреляционные функции сигналов, поступающих на излучатели:

$$R_1(\tau) = \frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)};$$

$$R_2(\tau) = -\frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$R_3(\tau) = \frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$S_1(\tau) = \frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)};$$

$$S_2(\tau) = -\frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$S_3(\tau) = \frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)}.$$
(11)

$$R_1(\tau) = \frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)};$$

$$R_2(\tau) = -\frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$R_3(\tau) = \frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$S_1(\tau) = \frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)};$$

$$S_2(\tau) = -\frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$S_3(\tau) = \frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)}.$$
(12)

где $R_i(\tau)$ и $S_i(\tau)$ – соответственно автокорреляционная и взаимно корреляционная функция сигнала квадратур сигнала на i -м излучателе модели. В том случае, если реализуемы корреляционные функции, получаемые по выражениям (11) и (12), то трехточечная модель также будет реализуема.

Показано, что синтез трехточечной модели упрощается при разделимости переменных в функциях $F_r(\gamma, \tau)$ и $F_s(\gamma, \tau)$:

$$\begin{aligned} F_r(\gamma, \tau) &= r(\tau)F_r(\gamma); \\ F_s(\gamma, \tau) &= s(\tau)F_s(\gamma), \end{aligned} \tag{13}$$

где $r(\tau)$ – нормированная автокорреляционная функция флуктуаций мгновенных значений для одноименных квадратурных составляющих комплексной огибающей имитируемого сигнала; $s(\tau)$ – взаимная нормированная корреляционная функция флуктуаций мгновенных значений синфазной и квадратурной составляющих комплексной огибающей имитируемого сигнала.

В этом случае выражения (11) и (12) примут вид:

$$\begin{aligned} R_1(\tau) &= P_1r(\tau); \\ R_2(\tau) &= P_2r(\tau); \\ R_3(\tau) &= P_3r(\tau); \\ S_1(\tau) &= P_1s(\tau); \\ S_2(\tau) &= P_2s(\tau); \\ S_3(\tau) &= P_3s(\tau), \end{aligned}$$

при выполнении условий равенства ПРВ ШК, формируемых трехточечной моделью и ПРВ ШК замещаемого объекта (9).

Доказана возможность разбиения сложного объекта на совокупность фрагментов, каждый из которых в отдельности может замещаться двух или трехточечной моделью. Таким образом, можно делить моделируемый объект на более мелкие фрагменты до тех пор, пока его свойства не будут удовлетворять условиям существования двухточечной или трехточечной модели.

В четвертом разделе полученные результаты развиты до уровня их практического использования. Предложены рекомендации по синтезу двух и трехточечных моделей распределенного объекта в виде алгоритма, позволяющего определить количество и расположение излучателей модели, а также характеристики сигналов, подводимых к ним.

В качестве примера использования результатов, полученных в предыдущих разделах, рассмотрено моделирование отражений от поверхности Земли применительно к бортовой РЛС обеспечения маловысотного полета. Для этого

были рассмотрены характеристики эхосигналов от поверхности Земли, а также основные принципы оценки рельефа при маловысотном полете.

Предложена структура и конструкция матричного имитатора (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид макета матричного имитатора

Разработанный матричный имитатор является частью комплекса имитации сигналов, его работа осуществляется под управлением компьютера в реальном масштабе времени. Его программное обеспечение позволяет: конструировать модель рельефа поверхности Земли, формировать команды управления и тестирования имитирующего комплекса и т.д.

Работа имитирующего комплекса показала, что матричный имитатор позволяет адекватно моделировать отражения от поверхности Земли.

В заключении перечислены основные результаты работы.

В приложениях представлены вспомогательные материалы, относящиеся ко второму разделу, описание алгоритма расчета мощностей сигналов, поступающих на излучатели трехточечной модели и алгоритма активации излучателей модели, вывод аналитических выражений, позволяющих по положению и угловым размерам замещаемого объекта определить параметры ПРВ ШК. Приведены акты, подтверждающие внедрение основных результатов работы.

Основные результаты работы

В диссертационной работе решены задачи, относящиеся к имитации эхосигналов при помощи некогерентной дискретной модели.

1. Определены возможности геометрических моделей при имитации отражений эхосигналов от распределённых объектов. Показано, что для имитации отражений от распределённых объектов с учетом ШК в качестве излучаемых сигналов предпочтительнее использовать некогерентные сигналы.

2. Установлено, что при имитации спектрально-корреляционных характеристик и ПРВ ШК с использованием двухточечной модели формируемые ею параметры ПРВ ШК зависят друг от друга, что не позволяет устанавливать положение КЦИ имитируемого объекта независимо от его угловых размеров. А на спектрально-корреляционные характеристики ШК накладываются ограничения, описываемые полученными в работе выражениями.

3. Предложена трёхточечная модель, лишенная недостатков двухточечной модели – позволяющая независимо друг от друга управлять параметрами ПРВ ШК в ограниченном диапазоне. Получены выражения, определяющие границы этого диапазона.

4. Для трёхточечной модели получены выражения, позволяющие определить мощности и корреляционные характеристики сигналов, подводимых к её излучателям, которые необходимы для обеспечения требуемых спектрально-корреляционных характеристик и ПРВ ШК.

5. На основании полученных теоретических результатов сформулированы рекомендации по синтезу матричных имитаторов отражений от распределённых объектов.

6. Предложена структура и конструкция матричного имитатора.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России

1. Никулин А. В. Замещение распределенного объекта трехточечной геометрической моделью / А.В. Никулин, М.А. Степанов // Вопросы радиоэлектроники. Серия Радиолокационная техника (РЛТ). - 2014. - вып. 2. - С. 77-86.

2. Никулин А.В. Малоточечная модель протяженного отражающего объекта / А.В. Никулин, А.В. Киселев, С.В. Тырыкин // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации, 2014, №4 (25), С. 79-88.

3. Никулин А. В. Замещение поверхности земли дискретной моделью при имитации радиолокационных эхосигналов от неё / А.В. Никулин, Р.Ю. Белоручский // Вопросы радиоэлектроники. Серия Системы отображения информации и управления спецтехникой. - 2012. - вып. 4. - С. 134-144.

Публикации в материалах конференций и других изданиях

4. Никулин А.В. Применение двухточечных моделей для моделирования эхосигналов сложных радиолокационных целей / А.В. Никулин, А.В. Киселев// Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2010. - 25 с. Библиогр.: 1 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 21.07.10 № 467-В2010.

5. Никулин А.В. Использование двухточечной модели для моделирования земной поверхности / А.В. Никулин, А.В. Киселев // Тезисы докладов всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (НТИ-2010). - Новосибирск, 2010. - С.349-351.

6. Никулин А.В. Моделирование шумов угловых координат дискретной модели поверхностно-распределенного объекта / А.В. Никулин, А.В. Киселев, И.С. Савиных // Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2010. – 35 с.: ил. – 11 Библиогр.: 2 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 29.12.10 № 739-В2010.

7. Никулин А.В. Экспериментальная апробация возможностей дискретных моделей при имитации эхосигнала от подстилающей поверхности / А.В. Никулин // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции

"Наука. Промышленность. Оборона"; Новосибирский государственный технический университет, - Новосибирск, 2011. - С. 463-467.

8. Никулин А.В. Замещение неровной поверхности Земли дискретными моделями в задаче имитации эхосигнала РЛС оценивания рельефа / А.В. Никулин, А.В. Киселев //Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2011. – 39 с.: ил. – 15 Библиогр.: 5 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 01.07.2011 № 313-В2011.

9. Никулин А.В. Имитация эхосигналов от неровной поверхности земли / А.В. Никулин // Дни науки НГТУ-2011: Материалы научной студенческой конференции / под ред. доц. С.В. Брованова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С.76-77

10.Никулин А.В. Программа восстановления рельефа местности по ее радиолокационной модели / А.В. Никулин// Тезисы докладов всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (НТИ-2011). - Новосибирск, 2011. – С. 294-297.

11.Никулин А. В. Исследование возможностей дискретных моделей поверхностно-распределенного объекта / А.В. Никулин// Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – С. 14-19.

12.Никулин А.В. Имитация эхосигналов от неровной поверхности Земли при помощи матрицы излучателей / А.В. Никулин // Сборник тезисов докладов Новосибирской межвузовской конференции "Интеллектуальный потенциал Сибири" (Часть 3) – Новосибирск : НГАСУ, 2012. - С.-36.

13.Никулин А.В. Алгоритм выбора активных излучателей из матрицы излучателей при моделировании отражений от поверхности Земли / А.В. Никулин, А.В. Киселев, Р.Ю. Белоруцкий // Материалы XI международной конференции "\"Актуальные проблемы электронного приборостроения\" (Новосибирск , 2 - 4 сентября, 2012 г.) - Новосибирск, НГТУ, 2012, том 4, С. 55-59.

14.Никулин А.В. Программное обеспечение синтеза рельефа / А.В. Никулин// Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 29 ноября - 2 дек. 2012 г. : в 7 ч.

15. Никулин А.В. Имитация эхосигналов от неровной поверхности земли / А.В. Никулин // Материалы научной студенческой конференции / под ред. доц. С.В. Брованова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. С. 74.

16. Никулин А.В. Связь параметров распределения шумов координат неровной поверхности с углами наклона моделируемых площадок / А.В. Никулин // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона"; Новосибирский государственный технический университет, - Новосибирск, 2012. -С. 454 – 458.

17. Никулин А.В. Сравнение трехточечной и многоточечной моделей поверхности Земли / А.В. Никулин // Труды XIV Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона"; Новосибирский государственный технический университет, - Новосибирск, 2013. -С. 450 – 454.

18. Никулин А.В. Математическое моделирование шумов угловых координат поверхности Земли / А.В. Никулин // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – С. 34–38.

19. Никулин А.В. Декомпозиция сложной радиолокационной цели / А. В. Никулин // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 21 ноября - 24 ноября. 2013 г. : в 10 ч

20. Никулин А.В. Возможность замещения распределённого объекта двухточечной моделью /А.В. Никулин// Труды XV Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона"; Новосибирский государственный технический университет, - Новосибирск, 2014. - С. 478 – 481.

21. Никулин А.В. Функция распределения плотности автокорреляции квадратурных составляющих сигналов отражателей поверхностно-распределенного объекта / А.В. Никулин // Труды XII международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014, том 4, с. 31-33.

22. Nikulin A. V. Quadrature components autocorrelation of signals from surface-distributed object reflectors density distribution function / A.V. Nikulin // "12TH International conference on actual problems of electronic instrument engineering" Novosibirsk, NSTU, 2014, vol. 1, PP. 313-315.

23. Никулин А. В. Свойства сигнала отраженного от земной поверхности / А. В. Никулин // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Ч.11. С.41-45.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел/факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 438. Подписано в печать 26.03.2015 г.