

На правах рукописи



Степанов Максим Андреевич

Матричные имитаторы угловых шумов радиолокационных объектов

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете

Научный консультант: **Киселев Алексей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета

Официальные оппоненты: **Доросинский Леонид Григорьевич**, доктор технических наук, директор департамента радиоэлектроники и связи, профессор.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента Б.Н. Ельцина»

Монаков Андрей Алексеевич, доктор технических наук, профессор.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Шпилов Сергей Эдуардович, доктор физ-мат. наук, доцент.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится «16» октября 2019 г. в 15 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, аудитория 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и на сайте www.tusur.ru.

Дата рассылки автореферата диссертации «12» июля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.268.04
доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

Актуальность темы исследования

В настоящее время при разработке перспективных радиолокационных станций (РЛС) значительную роль играет этап полунатурного моделирования, при котором в лабораторных условиях формируется сигнально-помеховая смесь, соответствующая работе РЛС в реальных условиях. Сформированная имитатором сигнально-помеховая смесь вводится в РЛС. Известно несколько способов ввода сигнала: в тракт приемника на промежуточной или рабочей частоте, через эфир с использованием антенны РЛС и др. Наиболее полным и достоверным считается ввод сигнала через эфир с использованием антенны РЛС. Это обеспечивает возможность проверки работы РЛС в целом, включая антенну.

Общеизвестно, что полунатурное моделирование отличается высокой достоверностью и позволяет существенно сократить объем натурных испытаний РЛС. В свою очередь это приводит к снижению затрат на разработку.

К традиционно моделируемым свойствам радиолокационных объектов относят: координаты (дальность, угловые координаты), доплеровские флуктуации, мощность эхосигнала и др. Методы моделирования указанных свойств хорошо изучены и имеют широкое практическое применение. Однако перечисленными свойствами характеристики эхосигналов от реальных радиолокационных объектов не исчерпываются.

Реальным радиолокационным объектам присуще явление углового шума, вызванного интерференцией в точке приема электромагнитных волн, отраженных от различных элементов (точек) радиолокационного объекта. Взаимодействие отражений от нескольких точек приводит к флуктуациям фазового фронта электромагнитной волны в точке приема. Как следствие, угловое положение объекта, измеряемое РЛС, флуктуирует. Это явление широко исследовалось отечественными и зарубежными учеными: Островитяновым Р.В., Басаловым Ф.А., Монаковым А.А., Delano R.H., Pfeffer I., Dunn J.H, Howard D.D. и другими.

Известно, что угловой шум оказывает существенное влияние на работу РЛС. Например, в режимах маловысотного полета, наблюдения антипода,

угловом сопровождении объектов и других. Известны решения, базирующиеся на физическом явлении углового шума и позволяющие оценить угловой размер объекта, осуществить его распознавание, проводить селекцию антипода. В целом, можно утверждать, что угловые шумы как физическое явление хорошо изучены и учитываются при работе РЛС.

Однако вопросы имитационного моделирования угловых шумов не развиты. Как правило, при проведении полунатурного моделирования используют либо точечный излучатель, не формирующий флуктуации фазового фронта, либо систему из нескольких неразрешимых антенной РЛС по угловым координатам точечных излучателей.

Основная проблема, с которой приходится встречаться при имитации отражений от распределенных радиолокационных объектов с использованием системы излучателей заключается в синтезе модели: определении местоположения излучателей и параметров их сигналов. Традиционно используют геометрический подход к моделированию. Он заключается в замещении объекта многоточечной геометрической моделью, представляющей собой совокупность точечных отражателей, расположенных определенным образом в области пространства, ограниченной размерами объекта. Свойства сигнала, отраженного от каждой из точек модели, определяются комплексным коэффициентом отражения и параметрами перемещения точки относительно фазового центра антенны РЛС. Общеизвестно, что геометрические модели обеспечивают высокую точность моделирования пространственной структуры объекта. Однако достигается это путем использования моделей, содержащих большое количество точек. Например, для представления пространственной структуры самолета требуется использовать десятки точек, поверхность Земли требует порядка 10^6 отражающих точек на элемент разрешения. Очевидно, что подход к моделированию, основанный на замещении каждой отражающей точки объекта отдельным излучателем, в этом случае физически не реализуем.

Более перспективным является использование так называемых матричных имитаторов (МИ), содержащих относительно небольшое количество излучателей. Система неразрешимых излучателей матричного имитатора базируется на широко известной в радиолокации двухточечной модели. В этом случае формируется кажущийся центр излучения (КЦИ), положение которого определяется отношением амплитуд и разностью фаз излучаемых сигналов. Такие модели называют когерентными, а устройства на их основе – матричными имитаторами. Однако даже при их использовании вопрос моделирования отражений от распределенных объектов и свойственных им флуктуаций углового положения, как правило, не ставится. Ограничиваются лишь угловыми перемещениями кажущегося центра излучения, что соответствует отражениям от простых (точечных) радиолокационных объектов.

Вопросы «поточечного» моделирования распределенных радиолокационных объектов на основе матричных имитаторов рассмотрены такими авторами как Stroupe С.Р., Pollon G.E., Тырыкин С.В. Однако теми же исследователями отмечалось, что большое количество точек объекта требует большого объема вычислений при синтезе модели. Большой объем вычислений ограничивает применение моделей при имитации в реальном масштабе времени, когда формируемые сигналы определяются текущим режимом работы РЛС. Кроме того, очевидно, что ошибки в задании параметров излучаемых сигналов будут приводить к ошибочному позиционированию кажущихся центров излучения – точек модели. Это резко снижает достоверность моделирования. Указанная проблема в литературе обозначена, но применительно к когерентным матричным имитаторам ее решения не рассмотрено.

В качестве альтернативы когерентным геометрическим моделям предлагается использовать некогерентные и матричные имитаторы на их основе. К излучателям таких матричных имитаторов подводятся некоррелированные нормальные случайные процессы с заданными спектральными свойствами. Подобные имитаторы формируют электромагнитную волну со статистическими свойствами флуктуаций фазового фронта, соответствующими замещаемому

объекту. В литературе представлено описание трехточечных некогерентных некогерентных моделей, приведены соотношения, позволяющие проводить их синтез по заданной корреляционной функции угловых шумов. Однако таким моделям и матричным имитаторам на их основе присущ ряд недостатков. Во-первых, ограниченный узкий диапазон параметров угловых шумов, которые способна обеспечить модель. Его границы определяются расстоянием между точками модели. Для его расширения необходимо с одной стороны сдвигать точки модели, с другой – раздвигать. В матричных имитаторах излучающие антенны неподвижны, возможности управления параметрами формируемых угловых шумов оказываются крайне ограничены. Во-вторых, итерационная процедура синтеза модели, обеспечивающей заданные спектрально-корреляционные свойства угловых шумов для объектов, не допускающих делимости пространственной и временной переменных в функциях, задающих плотность распределения авто- и взаимной корреляции квадратурных компонент эхосигнала по объекту. Более того, указанная процедура не всегда приводит к синтезу физически реализуемой модели. Указанные недостатки ограничивают практическое применение некогерентных матричных имитаторов.

Вместе с тем, используемые в настоящее время как основа для построения матричных имитаторов, когерентные и некогерентные геометрические модели являются лишь частными случаями. Для них коэффициент взаимной корреляции излучаемых сигналов равен единице либо нулю соответственно. Из литературы известна двухточечная модель, к излучателям которой подводятся коррелированные сигналы – частично когерентная модель. Однако анализа ее возможностей по имитации угловых шумов и тем более способа синтеза не приводится.

Использование геометрических моделей, точки которых излучают взаимно коррелированные сигналы, в качестве основы для построения матричных имитаторов требует проработки таких вопросов как: выбор и обоснование структуры матричного имитатора, конфигурации излучателей, выбор способа

формирования сигналов с заданными параметрами, обеспечение точности задания их параметров в точке наблюдения.

Таким образом, можно заключить, что известные в настоящее время подходы к имитационному моделированию электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов, имеют существенные ограничения: многоточечные модели подробны, но сложно реализуемы на практике, когерентные малоточечные модели чувствительны к ошибкам задания параметров сигналов, некогерентные могут быть синтезированы для ограниченного круга объектов.

Указанные проблемы сдерживают применение матричных имитаторов при полунатурной обработке РЛС.

Это определяет цель диссертационной работы.

Цель работы: обосновать методы имитации отражений от распределенных радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам, на основе матричных имитаторов, антенны которых излучают взаимно коррелированные сигналы.

Задачи

1. Теоретически обосновать метод синтеза модели произвольной геометрической конфигурации, точки которой излучают взаимно коррелированные сигналы и обеспечивающую равенство корреляционных функций угловых шумов модели и замещаемого объекта.

2. Синтезировать малоточечные геометрические модели, удовлетворяющие условиям адекватности для одно- и двухмерных замещаемых объектов при подведении к излучателям модели сигналов с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции.

3. Разработать методы синтеза матричных имитаторов, излучающих сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции, имитирующие отражения и рассеяние от распределенных радиолокационных объектов.

4. Определить требования к точности задания параметров взаимно коррелированных сигналов, формируемых матричным имитатором в точке наблюдения, при выполнении которых ошибка моделирования угловых шумов не превысит заданную величину.

5. Развить полученные теоретические результаты до уровня их практического использования, а также экспериментально апробировать теоретически полученные выводы и положения.

Положения, выносимые на защиту

1. Малоточечная геометрическая модель произвольной конфигурации, обеспечивающая равенство параметров ПРВ угловых шумов соответствующим параметрам замещаемого распределенного объекта, гарантирует равенство корреляционных функций угловых шумов модели и объекта при определении спектрально-корреляционных свойств излучаемых сигналов предложенным методом.

2. Предложенные двумерные конфигурации геометрических моделей, излучающих из точек сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции, обеспечивают адекватное моделирование угловых шумов распределенных радиолокационных объектов и возможность независимого управления параметрами их ПРВ как для двух взаимно ортогональных угловых координат, так и в пределах каждой из координат. При излучении моделью некоррелированных сигналов минимальное количество точек равно девяти. При излучении коррелированных сигналов – четырем.

3. Малоточечная геометрическая модель, излучающая из всех точек сигналы с одинаковыми авто- и взаимными корреляционными функциями квадратурных компонент, может адекватно замещать отражения только от радиолокационных объектов, обладающих свойством делимости пространственной и временной переменных в функциях распределения плотности авто- и взаимной корреляции квадратурных составляющих эхосигнала по объекту.

4. Для построения матричного имитатора, излучающего сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции и адекватно формирующего отражения от радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам, достаточно четырех излучателей в пределах элемента разрешения РЛС по углам. Излучатели располагаются в вершинах четырехугольника. Параметры излучаемых из них сигналов определяются как для четырехточечной частично когерентной модели.

Научная новизна

1. Разработан метод синтеза геометрической модели произвольной конфигурации, излучающей частично коррелированные сигналы и формирующей угловые шумы распределенных радиолокационных объектов с заданной корреляционной функцией.

2. Предложены конфигурации некогерентных и частично когерентных геометрических моделей, обеспечивающих заданные характеристики угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям угловых координат.

3. Обосновано минимальное количество неподвижных излучающих точек некогерентных и частично когерентных геометрических моделей, обеспечивающих возможность управления параметрами плотности распределения вероятности угловых шумов как по двум взаимно ортогональным направлениям, так и в пределах каждого из этих направлений.

4. Показано, что модель, составленная из виртуальных излучающих точек – кажущихся центров излучения – может адекватно замещать угловые шумы распределенных радиолокационных объектов.

5. Определена взаимосвязь требуемой точности задания параметров взаимно коррелированных сигналов, формируемых матричным имитатором в точке наблюдения, и точности моделирования угловых шумов.

Оригинальность и новизна выполненных исследований и полученных результатов подтверждаются публикациями в российских журналах из перечня ВАК, публикациями, индексируемыми в Scopus и Web of Science, патентом и свидетельством о регистрации программы для ЭВМ.

Практическая значимость

Полученные результаты могут найти применение при разработке перспективных РЛС на этапах полунатурного моделирования.

1. Предложенный алгоритм синтеза малоточечной геометрической модели произвольного радиолокационного объекта, адекватной по критерию равенства корреляционной функции угловых шумов модели и объекта, позволяет определить положения излучателей матричного имитатора и параметры подводимых к ним сигналов (мощность, коэффициенты взаимной корреляции, собственные спектрально-корреляционные свойства).

2. Определены требования к точности задания параметров сигналов, формируемых матричным имитатором в точке наблюдения. Их выполнение гарантирует заданную величину ошибки моделирования угловых шумов распределенных радиолокационных объектов.

3. Предложена структура и алгоритмы работы системы калибровки матричного имитатора, реализующие оценку и компенсацию неидентичности его каналов, что позволяет повысить достоверность моделирования.

4. Разработан и внедрен ряд матричных имитаторов, обеспечивающих формирование электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов.

Методы исследования

При проведении исследований в работе использовались методы статистической теории радиолокации протяженных целей, статистической радиотехники и радиофизики, математической статистики, теория флуктуации локационных сигналов. Цифровое моделирование угловых шумов распределенных радиолокационных объектов и обработка результатов экспериментов осуществлялось в среде MatLab.

Личный вклад

Все основные теоретические и практические результаты диссертации получены автором лично. Автором выполнены: постановка целей и задач исследования, выбор методов исследования, вывод аналитических соотношений,

построение математических моделей радиолокационных объектов, разработка алгоритмического и программного обеспечения матричного имитатора, анализ и обобщение результатов. Из 44 опубликованных работ 40 работ написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, результаты, связанные с темой работы, получены лично автором.

Достоверность результатов

Обеспечивается корректностью применения математического аппарата, согласованностью с результатами исследований других авторов, подтверждением теоретических выводов результатами моделирования на ЭВМ и результатами внедрения разработанных матричных имитаторов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях.

The 19-international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018, Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018; Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018); Наука. Промышленность. Оборона. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 18–20 апр. 2018; The 18-international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017; Наука. Промышленность. Оборона. 18 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г.; Электронные средства и системы управления. 13 Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 29 нояб. – 1 дек. 2017 г.; Современные проблемы радиоэлектроники, Красноярск 4–5 мая 2017 г. – Красноярск; 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016), Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk; Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016); The 16-International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015.; Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014); Актуальные проблемы электронного приборостроения 2012 (Новосибирск, 2-4 октября, 2012 г.)

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 44 работы, в том числе 21 статья, в журналах, входящих в перечень ВАК, 9 публикаций в изданиях, входящих в международные библиографические системы Scopus или Web of Science, 14 публикаций в других научных изданиях. Получен один патент РФ на изобретение, зарегистрировано одно свидетельство программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованных источников из 202 наименований и 1 приложения. Диссертация изложена на 268 страницах текста. Работа содержит 11 таблиц и 51 рисунок.

Результаты внедрения

Использование результатов диссертационной работы проходило в рамках: хоздоговора РТУ-3-11 между АО «ЗАСЛОН» и НГТУ; хоздоговора РТУ-2-17 между АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» и НГТУ.

Результаты диссертационной работы внедрены на указанных предприятиях, что подтверждается соответствующими актами.

Содержание работы

В **первом разделе** дан обзор исследований по решаемым вопросам, сформулированы основные задачи работы и намечены пути их решения.

Рассмотрены основные свойства электромагнитных волн, отраженных от радиолокационных объектов. Показано, что при имитационном моделировании отражений от радиолокационных объектов актуальной является задача имитации угловых шумов, характеризующих угловое положение замещаемого объекта и его угловые размеры.

Приведен обзор способов и средств имитации угловых шумов. Наиболее удобными для этого оказываются матричные имитаторы, базирующиеся на геометрических моделях объектов.

Показано, что моделирование отражений от распределенных объектов в настоящее время практически не проводится – моделируются как правило лишь отражения от точечных радиолокационных объектов. В настоящее время

матричные имитаторы базируются на когерентных (излучающих сигналы с жесткой фазовой привязкой) или некогерентных (излучающих не коррелированные сигналы) геометрических моделях. Когерентные матричные имитаторы требуют высокой точности задания параметров излучаемых сигналов. Недостаток некогерентных – ограниченный узкий диапазон управления параметрами формируемых угловых шумов.

Предложено в качестве основы для построения матричных имитаторов использовать частично когерентные геометрические модели. К излучателям таких моделей подводятся взаимно коррелированные сигналы. Предложенный подход помимо перспектив решения проблем, связанных с использованием в матричном имитаторе когерентных и некогерентных моделей, является обобщающим для них.

В заключении раздела сформулированы основные задачи исследования и намечены пути их решения.

Во втором разделе работы в удобной для дальнейшего использования форме получены условия, выполнение которых гарантирует адекватность геометрической модели произвольной конфигурации.

Угловые шумы характеризуются плотностью распределения вероятности (ПРВ) и корреляционной функцией. Соответственно, можно сформулировать условия адекватного моделирования угловых шумов.

1. Равенство параметров m и μ ПРВ угловых шумов модели и замещаемого объекта.

$$\begin{cases} m_M = m_\infty; \\ \mu_M = \mu_\infty, \end{cases} \quad (1)$$

где m_M, μ_M - параметры ПРВ угловых шумов модели; m_∞, μ_∞ - параметры ПРВ угловых шумов замещаемого объекта. Известно, что одномерная ПРВ угловых шумов для любых объектов определяется выражением:

$$w(\xi) = \frac{\mu}{2(1 + \mu^2 \cdot (\xi - m)^2)^{3/2}}.$$

2. Равенство корреляционных функций угловых шумов модели и замещаемого объекта.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2 \cdot r_{Mi}(\tau) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_i \cdot \xi_{Mi} \cdot \sigma_j \cdot \xi_{Mj} \cdot \rho_{i,j}^R(\tau) = \sum_{j=1}^K [\xi_{\infty j}^2 \cdot \sigma_{\infty j}^2 \cdot r_j(\tau)]; \\ \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2 \cdot s_{Mi}(\tau) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_i \cdot \xi_{Mi} \cdot \sigma_j \cdot \xi_{Mj} \cdot \rho_{i,j}^S(\tau) = \sum_{j=1}^K [\xi_{\infty j}^2 \cdot \sigma_{\infty j}^2 \cdot s_j(\tau)], \end{cases} \quad (2)$$

где $r_{Mi}(\tau)$ и $s_{Mi}(\tau)$ - коэффициенты авто- и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов, подводимых к i -той точке модели; ξ_{Mi} - обобщенная координата i -той точки модели; σ_i^2 - дисперсия сигнала, подводимого к i -той точке модели; $\rho_{i,j}^R(\tau)$ и $\rho_{i,j}^S(\tau)$ взаимные коэффициенты корреляции одноименных и разноименных квадратурных составляющих сигналов i -той и j -той точек модели; $r_j(\tau)$ и $s_j(\tau)$ - авто- и взаимные коэффициенты корреляции квадратурных составляющих эхосигналов, отраженных от j -той точки объекта; $\xi_{\infty j}$ - обобщенная координата j -той точки объекта; $\sigma_{\infty j}^2$ - дисперсия эхосигнала от j -той точки объекта.

Сформулированные условия дополняют традиционные критерии адекватного моделирования такие как: мощность эхосигнала в точке наблюдения, форма доплеровского спектра эхосигнала и др.

Показано, что для обеспечения физической реализуемости коэффициентов авто- и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов модели и всей геометрической модели в целом можно варьировать положение излучателей, мощности подводимых к ним сигналов и коэффициент взаимной корреляции сигналов. Известно, что указанные величины определяют параметры плотности распределения вероятности угловых шумов.

Из системы (2) видно, что модель, обеспечивающая адекватное моделирование угловых шумов радиолокационных объектов, не единственна. Для любого объекта может быть синтезировано бесконечное множество

моделей, различающихся между собой количеством и положением излучателей, а также параметрами подводимых к ним сигналов.

Под синтезом модели понимается определение количества точек, образующих ее и их местоположения, мощностей излучаемых сигналов, коэффициентов их взаимной корреляции и собственных спектрально-корреляционных свойств.

Наиболее удобными с точки зрения построения матричных имитаторов являются геометрические модели, не требующие перемещения излучающих точек при замещении отражений от различных радиолокационных объектов. Это позволяет дополнить сформулированные критерии адекватности моделирования требованиями к синтезируемым геометрическим моделям:

а. Модель должна обеспечивать возможность отдельного управления параметрами ПРВ угловых шумов для двух взаимно ортогональных угловых направлений обобщенной координаты, не требуя перемещения точек.

б. Модель должна обеспечивать возможность отдельного управления параметрами ПРВ угловых шумов в пределах каждого из рассматриваемых направлений обобщенной координаты, не требуя перемещения точек.

Третий раздел посвящен обоснованию метода синтеза геометрических моделей произвольной конфигурации, излучающих сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции и обеспечивающих равенство корреляционных функций угловых шумов модели и объекта.

Рассмотрены вопросы синтеза некогерентных геометрических моделей произвольной конфигурации. Полученные для них результаты обобщены на случай использования частично когерентных моделей.

Предложен способ синтеза геометрической модели произвольной конфигурации, излучающей из всех точек сигналы с одинаковыми авто- и взаимными корреляционными функциями квадратурных компонент (в (2) все $r_{Mi}(\tau) = r_M(\tau)$ и $s_{Mi}(\tau) = s_M(\tau)$). Коэффициенты корреляции $r_M(\tau)$ и $s_M(\tau)$ определяются по соотношениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_M(\tau) = \frac{\sum_{j=1}^K [\xi_{\infty j}^2 \cdot \sigma_{\infty j}^2 \cdot r_j(\tau)]}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2}; \\ s_M(\tau) = \frac{\sum_{j=1}^K [\xi_{\infty j}^2 \cdot \sigma_{\infty j}^2 \cdot s_j(\tau)]}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2}. \end{array} \right.$$

Получены условия, выполнение которых гарантирует их физическую реализуемость:

$$\frac{\sum_{j=1}^K [\xi_{\infty j}^2 \cdot \sigma_{\infty j}^2]}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2} = 1. \quad (3)$$

Показано, что подобные модели могут адекватно замещать отражения только от объектов, обладающих делимостью пространственной и временной переменных в функциях, определяющих распределение по объекту плотности авто- и взаимной корреляции квадратурных составляющих эхосигнала. Для объектов, не обладающих указанным свойством, использование таких моделей приводит к взвешиванию доплеровского спектра квадратом обобщенной координаты. Несмотря на взвешивание доплеровского спектра угловые шумы моделируются с заданными статистическими свойствами.

Предложенный метод синтеза модели развит на случай замещения радиолокационного объекта, не допускающего делимости пространственной и временной переменных в функциях, определяющих распределение плотности авто- и взаимной корреляции квадратурных составляющих эхосигнала. В этом случае к точкам модели подводятся сигналы с различными коэффициентами авто- и взаимной корреляции квадратурных составляющих.

Показано, что синтезированная таким образом модель не приводит к взвешиванию доплеровского спектра при формировании угловых шумов с

заданными параметрами. Условие физической реализуемости такой модели совпадает с (3).

Предложен спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных радиолокационных объектов. Он позволяет, зная распределение спектральной плотности мощности эхосигнала по замещаемому объекту, определить спектральные плотности мощности сигналов, подводимых к точкам геометрической модели произвольной конфигурации.

Предложенные методы синтеза некогерентной геометрической модели произвольной конфигурации развиты на случай частично когерентной модели. В этом случае дополнительно определяются коэффициенты взаимной корреляции для всех сигналов, подводимых к точкам модели. Показано, что, как и в случае некогерентных моделей, частично когерентная модель, излучающая из всех точек сигналы с одинаковыми коэффициентами авто- и взаимной корреляции квадратурных компонент, может быть использована лишь для объектов, допускающих разделимость пространственной и временной переменных. Если объект не обладает этим свойством, происходит взвешивание доплеровского спектра квадратом обобщенной координаты.

Предложен метод синтеза частично когерентной геометрической модели, свободной от указанного недостатка. При этом коэффициенты авто- и взаимной корреляции квадратурных компонент сигналов, подводимых к точкам модели, должны определяться по соотношениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{Mi}(\tau) = \frac{1}{2} \cdot A(\xi_{Mi}) \cdot \frac{\sum_{j=1}^K \sigma_{\infty j}^2 \cdot r_{\infty j}(\tau) \pm \sum_{j=1}^K \sigma_{\infty j}^2 \cdot \xi_{\infty j}^2 \cdot r_{\infty j}(\tau)}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sigma_i \cdot \xi_{Mi} \cdot \sigma_k \cdot \xi_{Mk} \cdot \rho_{i,k}^R}; \\ s_{Mi}(\tau) = \frac{1}{2} \cdot A(\xi_{Mi}) \cdot \frac{\sum_{j=1}^K \sigma_{\infty j}^2 \cdot s_{\infty j}(\tau) \pm \sum_{j=1}^K \sigma_{\infty j}^2 \cdot \xi_{\infty j}^2 \cdot s_{\infty j}(\tau)}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cdot \xi_{Mi}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sigma_i \cdot \xi_{Mi} \cdot \sigma_k \cdot \xi_{Mk} \cdot \rho_{i,k}^R}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где:

$$A(\xi_{Mi}) = \begin{cases} (N - Z) / N, & \text{при } \xi_{Mi} \geq 0; \\ Z / N, & \text{при } \xi_{Mi} < 0, \end{cases}$$

Z - количество точек модели, имеющих отрицательное значение обобщенной координаты. Верхние знаки выбираются при $\xi_{Mi} \geq 0$.

Определены условия, при которых синтезированная частично когерентная модель физически реализуема:

$$\frac{\sum_{j=1}^K [\xi_{\infty j}^2 \cdot \sigma_{\infty j}^2]}{\sum_{p=1}^N \sigma_p^2 \cdot \xi_{Mp}^2 + \sum_{p=1}^N \sum_{k=1}^N \sigma_p \cdot \xi_{Mp} \cdot \sigma_k \cdot \xi_{Mk} \cdot \rho_{p,k}^R} = 1.$$

Это условие переходит в (3) при подстановке в него $\rho_{p,k}^R = 0$, что соответствует излучению из точек некоррелированных сигналов – некогерентная геометрическая модель.

Доказано, что физическая реализуемость авто- и взаимных корреляционных функций квадратурных составляющих сигналов, подводимых к точкам модели, обеспечивается геометрической конфигурацией точек (ξ_{Mi}), мощностями их сигналов (σ_{Mi}^2) и коэффициентом взаимной корреляции сигналов ($\rho_{i,j}^R$). Указанные величины определяют параметры ПРВ угловых шумов. Можно утверждать, что модель, формирующая угловые шумы, параметры ПРВ которых равны соответствующим параметрам для замещаемого объекта, обеспечивает заданную корреляционную функцию угловых шумов при определении $r_{Mi}(\tau)$ и $s_{Mi}(\tau)$ по (4).

Определены условия, при которых когерентная геометрическая модель, поточечно замещающая распределенный радиолокационный объект, формирует угловые шумы с заданными статистическими свойствами. Для этого достаточно корректного моделирования положения всех отражающих точек объекта и обеспечить равенство авто- и взаимной корреляционной функции квадратурных составляющих сигнала кажущегося центра излучения с одноименными функциями замещаемой точки объекта. Это доказывает эквивалентность

реальных и виртуальных излучающих точек модели. Таким образом часть излучающих точек геометрической модели может быть заменена кажущимися центрами излучения.

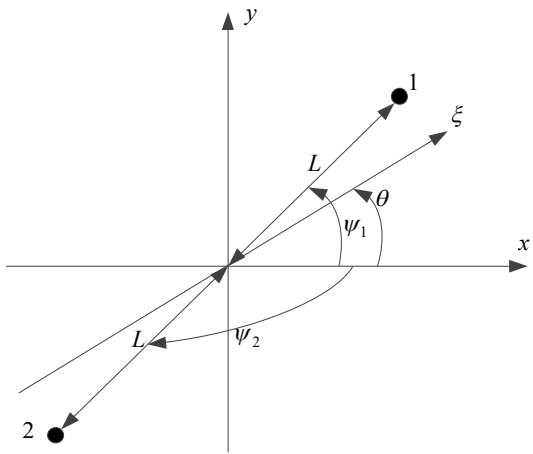
Показано, что для любого радиолокационного объекта может быть синтезировано бесконечное число адекватных геометрических моделей. Установлено, что возможность синтеза адекватной и физически реализуемой модели определяется ее способностью формировать заданные параметры ПРВ угловых шумов. Применительно к распределенным объектам эти параметры задаются для двух взаимно ортогональных направлений (азимут и угол места). Становится актуальной задача определения геометрической конфигурации модели, содержащей минимальное количество неподвижных точек и позволяющей управлять параметрами ПРВ формируемых угловых шумов как для двух взаимно ортогональных направлений, так и в пределах каждого из этих направлений. Задачи обоснования таких геометрических конфигураций решены в четвертом разделе для некогерентных моделей и в пятом для частично когерентных.

Теоретические результаты, полученные в данном разделе, подтверждены численным моделированием.

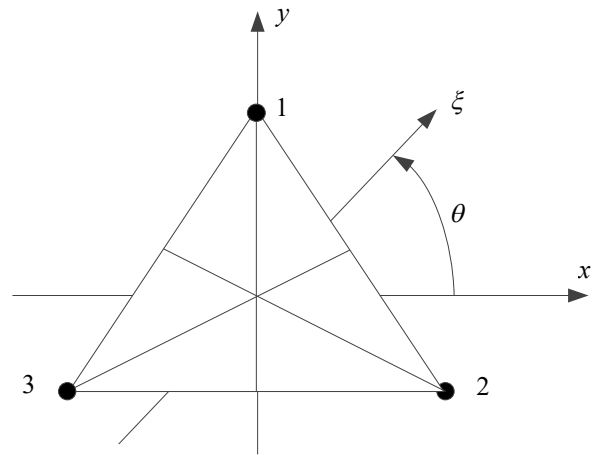
В четвертом разделе предложены и обоснованы геометрические конфигурации некогерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям.

Последовательно рассмотрены двух (рис. 1, а), трех (рис. 1, б), четырех (рис. 1, в), пяти (рис. 1, г) и девяти (рис. 1, д) точечные геометрические модели.

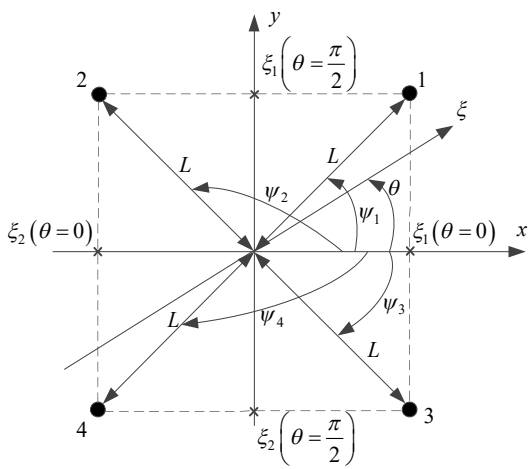
Показано, что известные некогерентные геометрические модели с двумя и тремя излучателями не позволяют решить задачу обеспечения заданной ПРВ угловых шумов по двум угловым координатам.



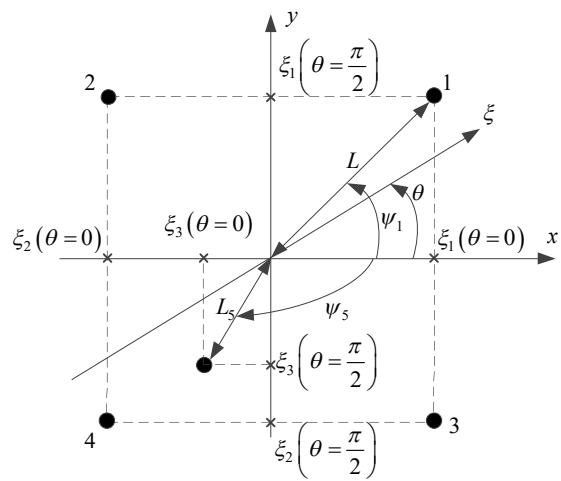
а)



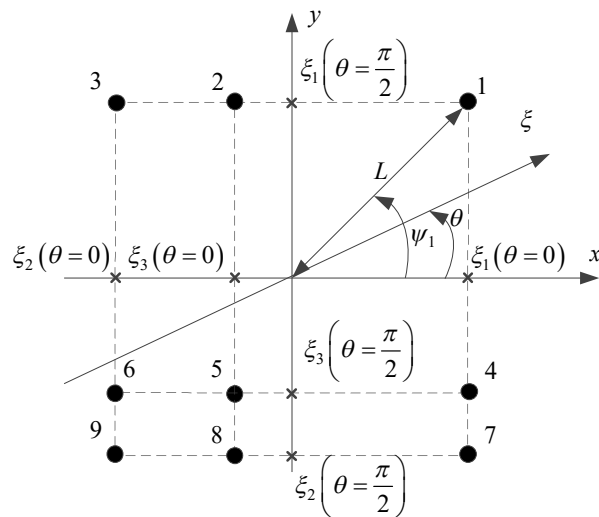
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Конфигурации рассмотренных моделей

Показано, что три излучателя, расположенные в вершинах правильного треугольника обеспечивают раздельное управление параметрами ПРВ угловых шумов для двух взаимно ортогональных направлений обобщенной координаты. В пределах одного из направлений, на которое проецируется три излучающие точки (рис. 1, б, ось x), модель допускает раздельное управление параметрами ПРВ угловых шумов. Для направления обобщенной координаты, ортогональному рассмотренному (рис. 1, б, ось y), образуется двухточечная геометрическая модель со свойственным ей ограничением – взаимосвязь параметров плотности распределения вероятности формируемых угловых шумов.

Показано, что увеличение числа точек модели до четырех, позволяет обеспечить заданную ПРВ угловых шумов по двум угловым координатам. Однако такая модель допускает независимую установку по каждому из взаимно ортогональных направлений обобщенной координаты только одного из параметров распределения угловых шумов (либо центра распределения, либо его эффективной «ширины»). Такая модель при визировании вдоль координатных осей сводится к двухточечной, а, следовательно, не позволяет независимо управлять параметрами ПРВ угловых шумов, относящиеся к этому направлению визирования. Для обеспечения заданных параметров ПРВ угловых шумов по каждой из координат необходимо перемещать точки модели. Это ограничивает применение такой модели в качестве основы для матричных имитаторов.

Доказано, что модели, содержащие пять и девять излучателей, расположенных на плоскости, допускают независимую установку обоих параметров распределения угловых шумов по двум угловым координатам. Это позволяет независимо устанавливать положение центра и угловые размеры моделируемого объекта по двум угловым координатам. Однако для модели с пятью излучателями мощность сигнала, подводимого к излучателю, расположенному внутри четырехугольника, влияет на параметры распределения угловых шумов по обеим координатам. В результате возникает ограничение на

область независимого управления этими параметрами. Для его снятия приходится перемещать пятый излучатель модели.

На основании анализа возможностей пятиточечной геометрической модели можно сформулировать требования, выполнение которых позволит осуществлять управление параметрами ПРВ угловых шумов как для двух взаимно ортогональных направлений, так и в пределах каждого из направлений при неподвижных точках:

1. Проекция излучающих точек на два ортогональных направления обобщенной координаты должны образовывать трехточечные неэквидистантные модели.

2. Излучение от каждой из точек обеих трехточечных неэквидистантных моделей должно формироваться суммой излучений как минимум двух излучающих точек.

Сформулированным требованиям удовлетворяет девятиточечная геометрическая модель. Однако она накладывает ограничения на область, в пределах которой возможно независимое управление вероятностными параметрами угловых шумов. Изменение границ этой области возможно только путем перемещения излучающих точек.

Для всех рассмотренных моделей получены аналитические соотношения, позволяющие (с учетом рассмотренных ограничений) по заданным параметрам ПРВ угловых шумов для двух взаимно ортогональных направлений провести их синтез, то есть определить мощности излучаемых сигналов.

Теоретические результаты подтверждены численным моделированием.

В пятом разделе предложены геометрические модели, излучающие коррелированные сигналы и обеспечивающие заданные параметры ПРВ угловых шумов радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам.

Рассмотрена одномерная двухточечная частично когерентная геометрическая модель. Получены соотношения, позволяющие проводить ее синтез. Показано, что в этой модели отсутствует взаимосвязь среднего значения

плотности распределения вероятности угловых шумов и ее ширины. Установлено, что задание параметров ПРВ угловых шумов, формируемых моделью, возможно в пределах обобщенной координаты: $-1 \leq m \leq 1$ и $0 \leq \mu < \infty$. Координаты нормированы к размеру модели.

Результаты, полученные для одномерной модели развиты на двумерный случай. Предложена двумерная частично когерентная геометрическая модель. Точки модели расположены в углах четырехугольника (рис. 1, в). Получены соотношения для ее синтеза. Показано, что она обеспечивает независимое управление параметрами ПРВ угловых шумов как для двух взаимно ортогональных направлений обобщенной координаты, так и в пределах каждого из направлений. Перемещение излучающих точек при этом не требуется, достаточно изменять лишь параметры излучаемых сигналов – отношение мощностей и коэффициенты взаимной корреляции.

Показано, что частично когерентные и некогерентные модели эквивалентны, т.е. взаимозаменяемы. Двухточечная частично когерентная геометрическая модель эквивалентна трехточечной некогерентной неэквидистантной. Третий излучатель некогерентной модели является виртуальным (кажущимся центром излучения). Его угловое положение совпадает с математическим ожиданием моделируемых угловых шумов (рис. 2).

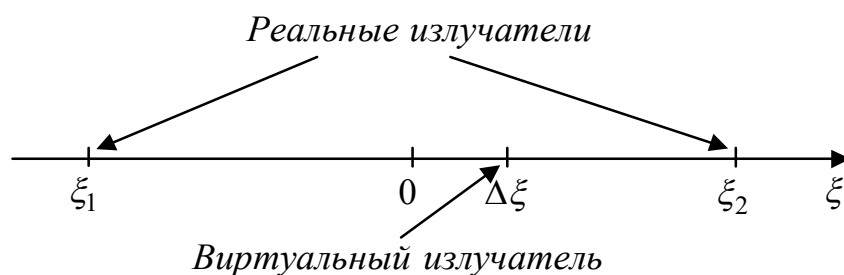


Рис. 2. Структура трехточечной неэквидистантной модели

Четырехточечная частично когерентная модель эквивалентна пятиточечной некогерентной. В этом случае виртуальным является излучатель, расположенный внутри квадрата (см. рис. 1, г).

Доказанная эквивалентность позволяет:

- проводить синтез матричного имитатора на основе модели любого типа – угловые шумы, сформированные эквивалентными моделями, будут иметь одинаковые статистические характеристики.
- использовать для всех моделей общий аппарат синтеза.
- осуществить переход от известной (синтезированной) модели одного типа к модели другого.

Теоретические результаты и выводы подтверждены моделированием.

Шестой раздел

В разделе рассматриваются вопросы, связанные с синтезом матричных имитаторов электромагнитных волн на основе геометрических моделей радиолокационных объектов. Переход от математической малоточечной модели объекта к матричному имитатору заключается в следующем:

1. Замещение точек малоточечной модели излучателями сигналов матричного имитатора.
2. Формирование сигналов, подводимых к излучателям, с параметрами, определяемыми малоточечной моделью.

Реализация матричного имитатора в виде аппаратно-программного комплекса неминуемо потребует учета влияния аналоговых узлов (усилителей, аттенюаторов, фазовращателей, излучателей и т.д.), используемых при его построении, а также погрешностей позиционирования излучателей. Свойственная аналоговым устройствам неидентичность, равно как и погрешности позиционирования, приведут к отклонению параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором, от заданных значений. Следствием этого будут ошибки моделирования угловых шумов. Вопросам оценки и компенсации этих ошибок посвящен шестой раздел.

Показано, что матричный имитатор можно представить в виде совокупности относительно независимых блоков (рис. 3): имитатор, осуществляющий формирование сигналов и перенос их на рабочую частоту; матричный излучатель, преобразующий сформированные радиосигналы в

электромагнитные поля; узлы синхронизации и канал информационной связи с РЛС.

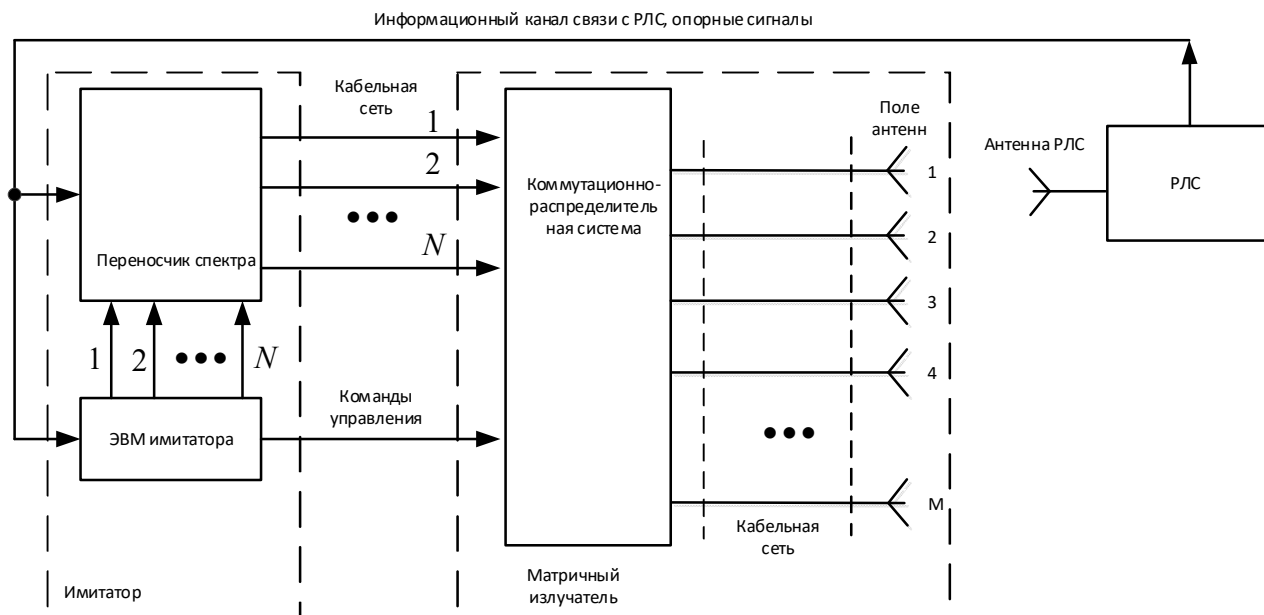


Рис. 3. Укрупненная структура матричного имитатора

В качестве рабочего аппарата для анализа влияния узлов матричного излучателя и канала распространения на точность задания в точке наблюдения параметров формируемых им сигналов, предложена его обобщенная структура, характеризующая прохождение сигналов от их формирования до сложения в фазовом центре антенны исследуемой РЛС (рис. 4). На рисунке 4 использованы следующие обозначения: $\dot{U}_{\text{vxi}}(t)$ - комплексные огибающие входных сигналов матричного излучателя; $\bar{X} = \{X_1; \dots; X_Q\}$ - вектор из Q команд управления коммутационно-распределительной системой; $\dot{K}_{KPC_m,n}$ - комплексный коэффициент передачи коммутационно-распределительной системы с n -того входа на m -тый выход; \dot{K}_{KCM} - комплексный коэффициент передачи кабельной сети; \dot{K}_{Am} - комплексный коэффициент передачи m -того излучателя; \dot{K}_{KPM} - комплексный коэффициент канала распространения электромагнитной волны от m -того излучателя до точки наблюдения (фазового центра антенны исследуемой РЛС).

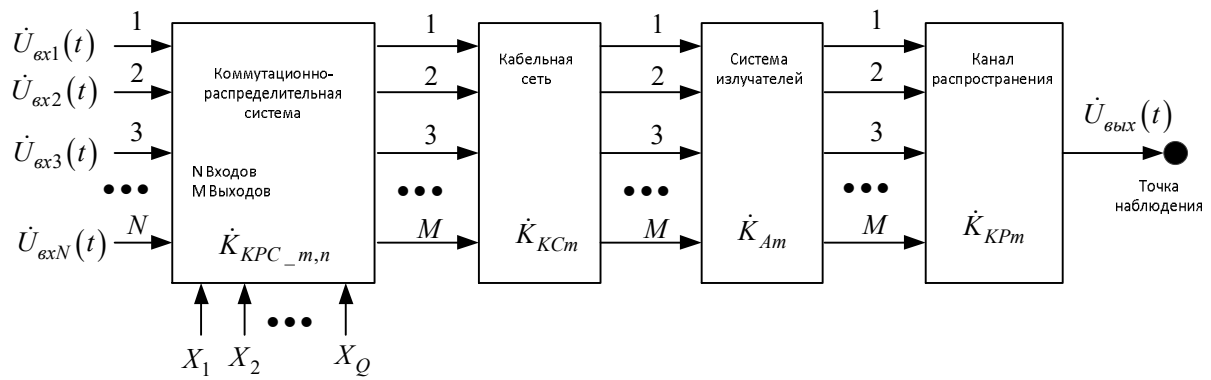


Рис. 4. Обобщенная структура матричного излучателя

Согласно обобщенной структуре и с учетом комплексных коэффициентов передачи всех узлов матричного излучателя и канала распространения, сигнал в точке наблюдения (фазовом центре антенны РЛС) можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_{\text{вых}}(t) = \sum_{m=1}^M \left(\Delta \dot{K}_{m,n} \cdot \sum_{n=1}^N \left[\dot{K}_{\Sigma_m,n} \cdot \dot{U}_{\text{вх_}n}(t - \tau) \right] \right),$$

где: $\Delta \dot{K}_{m,n}$ - случайный комплексный коэффициент передачи, определяемый как отношение истинного значения комплексного коэффициента передачи m -того канала (определенное с учетом дестабилизирующих факторов) к его эталонному значению; $\dot{K}_{\Sigma_m,n}$ - общий комплексный коэффициент передачи до точки приема от n -того входа матричного имитатора по m -тому каналу, определяемый как произведение коэффициентов передачи всех узлов; τ - задержка распространения комплексной огибающей.

Фактически, $\Delta \dot{K}_{m,n}$ определяет случайные отклонения комплексных коэффициентов передачи каналов матричного излучателя от эталонного значения. Они проявляются всегда. С учетом этого переход от математической геометрической модели к реальному устройству всегда будет сопряжен с появлением погрешностей.

Оценена требуемая точность задания параметров излучаемых сигналов матричного имитатора, обеспечивающая заданную ошибку моделирования угловых шумов. Установлена взаимосвязь точности задания параметров

излучаемых сигналов и точности установки параметров угловых шумов, формируемых моделью.

Показано, что требования к точности задания параметров излучаемых сигналов зависят от m и μ . Минимальные требования наблюдаются: для коэффициента взаимной корреляции в области $-0.3 < r < 0.7$; для отношения мощностей излучаемых сигналов (дБ) в области $-10 < t < 10$. Соответствующие диапазоны изменения параметров ПРВ угловых шумов: $-0.98 < m < 0.98$ и $1.5 < \mu < 3.4$.

Требования к идентичности каналов матричного имитатора высоки. Например, при ошибках m и μ не превышающих 5%, допустимая не идентичность каналов по модулю $|\Delta \dot{K}_{m,n}| \leq 0.5$ дБ и по фазе $\Delta \phi_{m,n} = \arg(\Delta \dot{K}_{m,n}) < 10 \dots 20^\circ$.

Таким образом, помимо ранее перечисленных узлов, матричный имитатор должен включать в себя систему калибровки, оценивающую неидентичность его каналов с целью дальнейшей ее компенсации.

Предложено два алгоритма ее работы, применимых при различных способах управления параметрами сигналов матричного имитатора. С их помощью производится оценка неидентичности комплексных коэффициентов передачи каналов. Оцененные значения используются для внесения поправок в формируемые сигналы с целью компенсации неидентичности комплексных коэффициентов передачи каналов матричного имитатора на параметры формируемых угловых шумов. Предложенные алгоритмы апробированы на обобщенной модели (рис. 4) и разработанном матричном имитаторе. Результаты апробации показали повышение достоверности моделирования угловых шумов при использовании системы калибровки матричного имитатора.

Рассмотрен вопрос вынос фазового центра антенны системы калибровки из фазового центра антенны РЛС. Получены соотношения, позволяющие

оценить и компенсировать систематическую ошибку установки фаз, вызванную этим выносом.

Седьмой раздел посвящен вопросам практического использования полученных теоретических результатов.

Предложен алгоритм синтеза малоточечной геометрической модели произвольного радиолокационного объекта, излучающей сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции. На первом этапе синтезируется подробная многоточечная геометрическая модель замещаемого объекта. На втором производится преобразование многоточечной модели в малоточечную. В качестве малоточечной модели предлагается использовать девятиточечную некогерентную модель, либо четырехточечную частично когерентную.

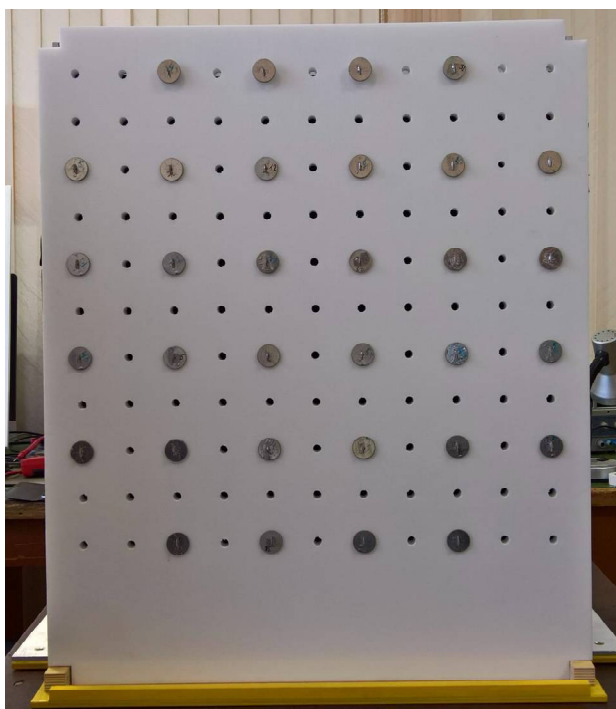
Предложенный алгоритм применен для синтеза геометрических моделей двух типовых радиолокационных объектов: подстилающая поверхность для отработки режима маловысотного полета и самолета В-52.

Рассмотрены вопросы, связанные с практической реализацией аппаратных и программных средств матричных имитаторов. Приведены рекомендации по выбору структуры излучающей части матричного имитатора.

Теоретические результаты и рекомендации по практическому применению легли в основу ряда матричных имитаторов эхосигналов и помех от распределенных радиолокационных объектов, изготовленных в рамках хозяйственных работ, проводимых параллельно с настоящими исследованиями:

1. два имитатора отражений от поверхности земли, обеспечивающие моделирование объектов, распределенных в вертикальной плоскости (т. е. по углу места);
2. имитатор для стенда, экспериментальной проверки получаемых теоретических результатов и отработки программного обеспечения матричных имитаторов;
3. два идентичных универсальных имитатора (шифры разработчика «ИРИС-131-2» и «ИРИС-131-3», рисунок 5).

Наибольший интерес представляют универсальные имитаторы, описание которых приведено в работе. Они обеспечивают двумерное моделирование и предназначены для имитации следующей номенклатуры объектов бортовым авиационным РЛС: эхосигналов от перемещающихся по углам точечных и распределенных объектов; эхосигналов от группы объектов; антипода; эхосигналов от поверхности земли; эхосигналов в режиме МЕТЕО; эхосигналов от поверхности земли в режиме маловысотного полета и др.



а)



б)

Рис. 5. Внешний вид матричного излучателя ИРИС-131-2 в сборе. а) – вид со снятым защитным кожухом; б) – вид с установленным защитным радиопрозрачным кожухом

Внешний вид одного из разработанных матричных излучателей приведен на рис. 5. Конструктивно матричный излучатель выполнен в металлическом корпусе. В одной из стенок закреплены печатные излучающие антенны. Для защиты от внешних воздействий они защищены радиопрозрачным материалом. Внутри корпуса располагаются узлы коммутационно-распределительной системы. Управление ей осуществляется по каналу USB 2.0. Радиочастотные

сигналы с имитатора сигналов подаются через разъемы, расположенные на боковой стенке корпуса матричного излучателя.

В заключении перечислены основные результаты работы.

В приложении приведены акты о внедрении основных результатов работы.

Заключение

В диссертационной работе теоретически обоснованы способы имитационного моделирования электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов на основе матричных имитаторов, антенны которых излучают взаимно коррелированные сигналы.

1. Разработан аппарат синтеза геометрических моделей произвольной конфигурации, излучающих сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции и адекватных по критерию равенства корреляционных функций угловых шумов модели и замещаемого объекта. Определение параметров сигналов, излучаемых из точек модели, предложенным методом гарантирует равенство корреляционных функций угловых шумов модели и объекта, если ПРВ угловых шумов, формируемых моделью, совпадает с ПРВ угловых шумов замещаемого объекта.

2. Предложен ряд некогерентных малоточечных геометрических моделей распределенных объектов. Рассмотрены их возможности по замещению угловых шумов распределенных радиолокационных объектов. Показано, что минимальное количество точек некогерентной геометрической модели, обеспечивающей заданные параметры ПРВ угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям при неподвижных точках, равно девяти.

3. Предложен ряд частично когерентных малоточечных геометрических моделей распределенных объектов. Показано, что минимальное количество точек геометрической модели, излучающей коррелированные сигналы, обеспечивающей заданные параметры ПРВ угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям при неподвижных точках, равно четырем. Аппарат синтеза частично когерентных моделей может быть использован для

синтеза когерентных и некогерентных моделей, которые являются частным случаем.

4. Показано, что когерентная геометрическая модель может адекватно замещать отражения от распределенных радиолокационных объектов по критерию равенства корреляционных функций угловых шумов модели и объекта. При этом каждая из точек объекта замещается своим кажущимся центром излучения, формируемым моделью и излучающим сигнал со спектрально-корреляционными свойствами, что и у замещаемой блестящей точки. Фактически, это означает эквивалентность реальных излучающих точек геометрической модели и кажущихся центров излучения.

5. Оценена адекватность перехода от математической геометрической модели к устройству, формирующему отраженные электромагнитные волны от распределенных радиолокационных объектов – матричному имитатору. Определены ошибки моделирования, возникающие при таком переходе. Предложены технические решения, позволяющие обеспечить ошибки моделирования матричными имитаторами отражений от распределенных радиолокационных объектов не выше заданных значений.

Полученные теоретические результаты имеют практическое значение для разработки матричных имитаторов электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов.

1. Сформулирован алгоритм синтеза малоточечной геометрической модели произвольного радиолокационного объекта. Он позволяет синтезировать двумерную малоточечную геометрическую модель произвольного радиолокационного объекта, к точкам которой подводятся сигналы с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции.

2. Сформулированы требования к допустимой неидентичности каналов передачи матричного имитатора, выполнение которых обеспечивает заданную точность моделирования. Предложены алгоритмы калибровки матричного имитатора, позволяющие оценить и компенсировать неидентичность его каналов. В конечном счете это повысит достоверность моделирования.

3. Определена структура и предложена обобщенная модель матричного имитатора. Она позволяет прогнозировать возможности и точностные характеристики матричных имитаторов на этапе их разработки.

Полученные в работе результаты дают основание утверждать, что теоретически обоснованы подходы и методы, имеющие существенное значение для имитации отражений от распределенных радиолокационных объектов.

Теоретические результаты доведены до уровня рекомендаций по разработке матричных имитаторов электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов.

Предложены технические решения по имитации отраженных от радиолокационных объектов электромагнитных волн, базирующиеся на полученных теоретических результатах. Разработан и внедрен ряд аппаратно-программных комплексов полунатурного моделирования отражений от радиолокационных объектов. Основой каждого из комплексов является матричный имитатор.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. Степанов М.А., Калмыков И.Ю., Дуркин В.В. Возможности позиционирования кажущегося центра излучения в трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 69–77.

2. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Алгоритмы расчета амплитуд сигналов трехточечного матричного имитатора для установки заданного положения кажущегося центра излучения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 57–69.

3. Степанов М.А., Никулин А.В. Замещение распределенного объекта трехточечной геометрической моделью // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 77–85.

4. Степанов М.А., Савиных И.С. Преобразование систем координат в задачах имитации радиолокационной обстановки // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 86–93.
5. Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Задание отражающих свойств распределенных объектов в терминах шумов координат // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. -. 2015. Т. 3. С. 17–28.
6. Степанов М.А. Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2015. № 5. С. 57–67.
7. Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат распределенных объектов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 4. С. 19–27.
8. Степанов М.А., Киселев А.В., Белявская Н.В., Тырыкин С.В. Обобщенная модель матричного имитатора электромагнитных полей, отраженных от точечных и распределенных радиолокационных объектов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2016. № 4. С. 11–17.
9. Степанов М.А., Белявская Н.В., Киселев А.В. Синтез численного алгоритма калибровки линейного матричного имитатора // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2016. № 4. С. 17–24.
10. Степанов М.А., Киселев А.В., Сабитов Т.И. Границы области достижимых значений параметров функции распределения шумов координат распределенного радиолокационного объекта, замещаемого геометрической моделью, составленной из излучателей коррелированных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2017. № 4. С. 36–39.
11. Степанов М.А., Киселев А.В. Модель распределенного объекта, излучающая статистически независимые сигналы с одинаковыми коэффициентами авто- и взаимной корреляции квадратур // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2017. № 4. С. 28–32.

12. Степанов М.А., Киселев А.В. Пятиточечная модель радиолокационных объектов, распределенных по угловым координатам // Радиопромышленность. 2017. № 4. С. 75–80.

13. Степанов М.А., Сабитов Т.И., Киселев А.В. Модель распределенного радиолокационного объекта, составленная из излучателей коррелированных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2017. № 4. С. 40–43.

14. Степанов М.А., Подкопаев А.О., Тырыкин С.В. Четырехточечная модель двумерного распределенного объекта на основе излучателей коррелированных сигналов // Радиопромышленность. 2018. Т. 28, № 4. С. 28–34.

15. Степанов М.А., Подкопаев А.О., Киселев А. В. Об эквивалентности двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 62–67.

16. Подкопаев А.О., Степанов М.А., Киселев А. В. Оценка и компенсация систематических ошибок калибровки матричного имитатора // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 4. С. 24–28.

17. Киселев А. В., Артющенко В.В., Никулин А.В., Степанов М.А. Спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. Т. 4. С. 34–39.

18. Артющенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Синтез инвариантной четырехточечной модели поверхностно-распределенного объекта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. -. 2018. Т. 4. С. 52–64.

19. Степанов М.А. Моделирование отражений от поверхностно-распределенных объектов на примере фрагмента подстилающей поверхности // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 22 – 26.

20. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А. В. Требования к точности задания параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4.

21. Подкопаев А.О., Степанов М.А. Синтез двухточечной частично когерентной модели, обеспечивающей заданные корреляционные

характеристики угловых шумов, на основе ее эквивалентности трехточечной некогерентной модели с разделимостью пространственной и временной координаты // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 16 – 21.

Публикации в изданиях, включенных в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus

1. Stepanov M.A. Calculation of Modification of Width of Doppler Spectra // Proceedings The 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology - KORUS-2005. Novosibirsk: NSTU, 2005. С. 234–235.

2. Stepanov M.A., Kiselev A.V. The impact of turbulent atmosphere on detection characteristics of a radar system with MTI // Radioelectronics and communications systems. 2005. Т. 48, № 12. С. 33–37.

3. Stepanov M.A., Kiselev A.V. Signal reception characteristics estimation of radar with moving-target indication in case of turbulent atmosphere // Radioelectronics and communications systems. 2007. Т. 50, № 50. С. 35–40.

4. Stepanov M.A. Geometrical method of signal parameters definition for a three-point matrix simulator // 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [Proc]. Altai, Erlagol: IEEE, 2015. С. 172–174.

5. Belyavskaya N.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Digital model and calibration algorithm of linear matrix simulator // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): [Proc]. IEEE, 2016. С. 298–301.

6. Kiselev A.V., Stepanov M.A., Sabitov T.I. Two-point model composed of radiators of correlated signals // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: [Proc]. Altai, Erlagol: NSTU, 2017. С. 131–134.

7. Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A. Possibilities of a two-point model, radiating correlated signals // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: [Proc]. Altai, Erlagol: NSTU, 2017. С. 91–93.

8. Kiselev A.V., Artyushenko V.V., Nikulin A.V., Stepanov M.A. Spectral method of synthesis of geometric models of surface-distributed objects // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: proc. Erlagol, Altay: IEEE Computer Society, 2018. С. 98–103.

9. Stepanov M.A., Kiselev A.V. A distributed object model with division into space and time variables // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: [Proc]. Altai, Erlagol: IEEE Computer Society, 2018. С. 163–166.

Патенты

1. Степанов М.А., Киселев А.В., Тырыкин С. В., Никулин А.В. Способ имитации радиолокационных отражений: пат. 2610837 РФ.

2. Артющенко В.В, Никулин А.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Программа для расчета с использованием графических процессоров комплексной огибающей эхосигнала от распределенных радиолокационных объектов: пат. 2018666476 РФ. 2018.

Публикации в других научных изданиях

1. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Установка положения эквивалентного центра излучения в трехточечном матричном имитаторе // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2012): тр. 11 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Т. 4. С. 48–52.

2. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Определение параметров трехточечного матричного имитатора как суперпозиции двухточечных моделей // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2012): тр. 11 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Т. 4. С. 34–36.

3. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Геометрический метод определения параметров сигналов трехточечного матричного имитатора // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Т. 4. С. 34–36.

4. Степанов М.А., Белявская Н.В. Форма фазового фронта электромагнитной волны, формируемой синфазным двухточечным матричным

имитатором // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 12. С. 47–49.

5. Степанов М.А., Киселев А.В., Тырыкин С.В., Белявская Н.В. Точность оценки амплитудной неидентичности каналов матричного имитатора // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 12. С. 28–31.

6. Степанов М.А., Киселев А.В., Тырыкин С.В., Белявская Н.В. Стенд разработчика алгоритмического и программного обеспечения матричных имитаторов радиоэлектронной обстановки // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 12. С. 56–59.

7. Степанов М.А., Сабитов Т.И. Модель распределенного радиолокационного объекта на основе системы излучателей коррелированных случайных сигналов // сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов посвящ. 122-й годовщине Дня радио. Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 92–95.

8. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А. В. Двухточечная геометрическая модель распределенного радиолокационного объекта, составленная из излучателей случайных сигналов с заданным коэффициентом взаимной корреляции // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2017. Т. 2. С. 274–279.

9. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А. В. Модель распределенного радиолокационного объекта на основе коррелированных излучателей // Электронные средства и системы управления: материалы докл. 13 Междунар. науч.-практ. конф. Томск: В-Спектр, 2017. Т. 1. С. 43–46.

10. Подкопаев А.О., Степанов М.А. Моделирование параметров плотности распределения вероятностей шумов координат // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: НГТУ, 2017. Т. 2. С. 269–274.

11. Степанов М.А., Артюшенко В.В. Геометрическая модель, составленная из девяти точек, излучающих статистически не связанные случайные сигналы // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф. 2018. Т. 4. С. 179–182.

12. Подкопаев А.О., Степанов М.А. Границы области эквивалентности двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной моделей // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск: НГТУ, 2018. Т. 4. С. 222–226.

13. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А.В. Оценка стабильности параметров функции распределения шумов координат, моделируемых двухточечной моделью распределенного объекта на коррелированных излучателях // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Т. 2. С. 225–229.

14. Киселев А. В., Степанов М.А. Замещение сложного радиолокационного объекта двухточечной моделью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 4. С. 76–81.