

На правах рукописи



Подкопаев Артемий Олегович

Синтез малоточечных частично когерентных моделей радиолокационных  
объектов на основе эквивалентных им некогерентных моделей

Специальность 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2022

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

**Научный руководитель:** **Степанов Максим Андреевич**,  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Колтышев Евгений Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, главный специалист, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»

**Шпилов Сергей Эдуардович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится « 02 » марта 2022 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения 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: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/o37cb1hk>

Автореферат разослан «     » января 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.415.03,  
доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В процессе разработки и производства современных радиолокационных систем (РЛС) большую значимость имеет этап проверки разрабатываемой системы на правильность выполнения поставленных задач. Можно выделить несколько основных видов испытаний РЛС: математическое моделирование, полунатурное моделирование и натурное. В настоящее время широкое распространение получило полунатурное моделирование, которое позволяет сочетать точность, соответствующую работе с реальным устройством, и низкие затраты экономических и временных ресурсов, характерные для методов математического имитационного моделирования.

На этапе полунатурного моделирования реальные условия работы РЛС формируются в лаборатории. Радиоэлектронная обстановка, максимально приближенная к реальной, создается при помощи имитаторов радиосигналов. Испытуемое устройство осуществляет прием и обработку сформированных имитаторами эхо-сигналов от смоделированного объекта радиолокации. Такой подход считается наиболее полным и достоверным, так как обеспечивает возможность проверки как антенной части РЛС, так и последующих блоков обработки сигналов.

Основными задачами радиолокации являются: обнаружение, распознавание, сопровождение и определение различных параметров объекта радиолокации (цели) с помощью радиоволн. В настоящее время достаточно подробно проработаны методы моделирования точечных радиолокационных объектов с традиционным набором свойств, таких как угловые координаты, дальность, мощность эхо-сигналов, доплеровские флуктуации и др. Однако размер и форма объекта в реальных условиях оказывают большое влияние на определение его параметров на приемной стороне: свойств формы объекта, скорости движения составляющих его фрагментов, неравномерности отражательной способности и др. В точке приема эхо-сигналов оценивается совокупность электромагнитных

волн, отраженных от распределенного в пространстве объекта, с разными фазами и амплитудами. В результате наблюдаются флуктуации фазового фронта принимаемой совокупности волн и, следовательно, флуктуации оценки углового положения объекта радиолокации. Это явление называется угловыми шумами.

Исследованиями угловых шумов и вопросами их моделирования занимались такие отечественные и зарубежные ученые, как Островитянов Р. В., Басалов Ф. А., Монаков А. А., Киселев А. В., Савиных И. С., Тырыкин С. В., Delano R. H., Pfeffer I., Dunn J. H., Howard D. D. и др.

Угловые шумы могут приводить к существенным ошибкам в определении угловых координат и размеров как самих распределенных объектов радиолокации, так и точечных целей, наблюдаемых на их фоне, например, на фоне таких источников пассивных помех, как метеообразования, облака дипольных отражателей, фрагменты земной поверхности и др. Таким образом, задача моделирования угловых шумов от распределенных объектов радиолокации является актуальной и значимой.

Традиционным способом замещения распределенных в пространстве объектов радиолокации является синтез многоточечной геометрической модели. При этом весь объект разбивается на большое количество фрагментов, формирующих независимые отражения. Каждый из таких фрагментов в модели рассматривается как точечный отражатель. Характеристики сигнала, излучаемого (отражаемого) такой точкой, определяются комплексным коэффициентом отражения и свойствами движения этой точки относительно РЛС. Такие модели позволяют с большой точностью замещать распределенные объекты радиолокации, но, как правило, содержат большое количество точек: сотни и даже тысячи точек в пределах одного элемента разрешения РЛС. Поэтому в настоящее время большое распространение получили малоточечные геометрические модели и матричные имитаторы на их основе.

Малоточечные модели содержат небольшое количество точек (до девяти для двумерного исполнения), синтезируются на основе многоточечных и

замещают только ту область распределенного объекта, которая попала в рассматриваемый элемент разрешения РЛС.

Моделирование электромагнитных волн, отраженных от радиолокационных объектов в этом случае, осуществляется с помощью матричных имитаторов (МИ). Они представляют собой жестко связанную систему небольшого количества излучателей, к которым подводятся сигналы с заданными характеристиками. Каждый излучатель матричного имитатора соответствует точке геометрической модели объекта. В простейшем случае МИ содержит два излучателя и располагается в дальней зоне приемной антенны РЛС. Совокупное излучение нескольких не разрешаемых приемной антенной источников формирует кажущийся центр излучения (КЦИ), положение которого определяется соотношением мгновенных значений сигналов, излученных МИ и наблюдаемых в точке приема. Если сигналами, подводимыми к излучателям МИ, являются случайные процессы, то и положение КЦИ во времени также будет случайным. Закон плотности распределения вероятностей (ПРВ) положения КЦИ совпадает с законом плотности распределения вероятностей угловых шумов. Таким образом, флуктуации КЦИ позволяют моделировать угловые шумы распределенного объекта радиолокации.

Среди малоточечных геометрических моделей можно выделить несколько разновидностей, различающихся величиной статистической связи между излучаемыми сигналами: когерентные, некогерентные и частично когерентные.

Когерентные модели излучают сигналы с коэффициентом взаимной корреляции, равным 1, что предъявляет большие требования к фазировке сигналов в точке приема. Например, 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. Исторически когерентные модели появились раньше двух других видов. Такие модели излучали детерминированные сигналы, а положение КЦИ регулировалось путем управления амплитудами и фазами излучаемых сигналов. Как правило,

когерентные модели не применялись для моделирования угловых шумов распределенных объектов, а лишь обеспечивали угловое перемещение КЦИ, что соответствует замещению отражений от перемещающейся относительно РЛС точечной цели.

Из-за указанного недостатка когерентных моделей следующим этапом в развитии матричных имитаторов стали некогерентные модели. К излучателям некогерентных моделей подводятся сигналы – некоррелированные случайные процессы. Флуктуации формируемого таким способом КЦИ позволяют моделировать угловые шумы распределенных объектов. Некогерентные модели свободны от требований к фазировке излучаемых сигналов. Управление КЦИ происходит за счет перераспределения мощностей сигналов, подводимых к излучателям. В литературе подробно рассмотрены свойства и вопросы синтеза одномерных трехточечных неэквидистантных некогерентных моделей, достоверно замещающих отражения от одномерных распределенных объектов, а также пяти- и девятиточечных двумерных неэквидистантных моделей, замещающих отражения от двумерных распределенных объектов и допускающих независимое регулирование параметров ПРВ и спектрально-корреляционных характеристик угловых шумов вдоль двух ортогональных осей координат. Однако некогерентные модели способны обеспечить значения параметров ПРВ угловых шумов только в ограниченном диапазоне, что приводит к необходимости увеличения используемого количества точек модели и, как следствие, излучающих антенн МИ. Важно отметить, что в настоящее время существует большое количество синтезированных малоточечных некогерентных моделей распределенных объектов радиолокации.

Известны малоточечные геометрические модели, к излучателям которых подводятся коррелированные сигналы. Модуль коэффициента взаимной корреляции принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Такие модели называются частично когерентными. Их возможности и свойства при моделировании отражений от распределенных объектов с учетом угловых шумов были

рассмотрены в ряде недавних работ Степанова М. А. и Сабитова Т. И. Частично когерентные модели обладают по сравнению с двумя другими видами определенными преимуществами. В сравнении с когерентными, частично когерентные модели имеют пониженные требования к фазировке излучаемых сигналов. В сравнении с некогерентными – способны обеспечивать значения параметров ПРВ угловых шумов в более широком диапазоне. Это означает меньшее требуемое количество излучающих антенн в составе матричного имитатора: две вместо трех – для одномерных моделей и четыре вместо пяти или девяти – для двумерных моделей. Однако на данный момент практически не существует синтезированных частично когерентных моделей распределенных объектов радиолокации и матричных имитаторов, созданных на их основе.

Таким образом, вопрос синтеза и накопления базы синтезированных частично когерентных моделей отражений от распределенных объектов радиолокации с учетом угловых шумов является важным и актуальным. При этом известно большое количество синтезированных некогерентных моделей таких объектов. Возможность перехода от некогерентных моделей к частично когерентным означает возможность синтеза частично когерентных моделей на основе известных некогерентных.

Это определяет цель диссертационной работы.

**Цель работы:** обосновать метод синтеза частично когерентных геометрических моделей распределенных объектов радиолокации на основе их известных некогерентных малоточечных моделей.

Для достижения поставленной цели решены следующие **основные задачи**.

1. Доказана эквивалентность двумерных некогерентных и частично когерентных моделей и определены ее границы, в пределах которых модели обеспечивают заданные параметры ПРВ угловых шумов.

2. Разработан математический аппарат синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей замещаемого радиолокационного объекта.

3. Разработан математический аппарат синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих требуемые спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей замещаемого радиолокационного объекта.

4. Полученные теоретические результаты развиты до уровня рекомендаций к их практическому применению на примере синтеза частично когерентной модели метеообразования.

#### **Методы исследования**

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

**Достоверность и обоснованность теоретических результатов** обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата, подтверждением теоретических выводов и результатов методами математического и имитационного программного моделирования на ЭВМ, а также положительными результатами апробации и внедрения.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Двумерные частично когерентные и некогерентные модели эквивалентны в том случае, если попарно эквивалентны одномерные малоточечные модели, получаемые путем проецирования точек двумерных моделей на две взаимно ортогональные оси координат.

2. Частично когерентные модели обеспечивают более широкий диапазон изменения параметров ПРВ угловых шумов, чем некогерентные, при равном угловом размере модели.

3. Частично когерентные модели, синтезированные на основе эквивалентных им малоточечных некогерентных моделей, обеспечивают формирование угловых шумов распределенных объектов с заданными параметрами ПРВ и формой корреляционной функции при меньшем количестве точек модели.



## **Научная новизна работы**

1. Показана эквивалентность двумерных четырехточечных частично когерентных и пяти- или девятиточечных некогерентных моделей с точки зрения тождественности обеспечиваемых ими параметров ПРВ угловых шумов. На основе неравенств, определяющих возможности некогерентных моделей по управлению параметрами ПРВ угловых шумов, определены границы этой эквивалентности.

2. Показано преимущество частично когерентных моделей по сравнению с некогерентными, заключающееся в более широком диапазоне изменения параметров ПРВ угловых шумов при равных угловых размерах моделей.

3. Обоснован метод синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих требуемые параметры ПРВ и спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей. При этом один или несколько излучателей некогерентной модели замещаются виртуальными, формируемыми частично когерентной моделью.

## **Практическая ценность результатов**

Полученные результаты могут быть применены в имитаторах радиосигналов с целью полунатурного моделирования пространственно распределенных объектов радиолокации.

1. Получены математические соотношения, позволяющие перейти от некогерентной модели к частично когерентной, обеспечивающей требуемые параметры угловых шумов. Это позволит сократить количество излучающих точек матричного имитатора до двух для радиолокационных объектов, распределенных по одной угловой координате, и до четырех – для радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам. Математические соотношения определяют связь мощностей сигналов, подводимых к точкам некогерентной и частично когерентной моделей, а также коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых точками частично когерентной модели, и их собственные спектрально-корреляционные свойства.

2. Разработан алгоритм замещения метеообразования частично когерентной моделью. Он позволяет синтезировать четырехточечную частично когерентную модель, формирующую отражения от замещаемого метеообразования с учетом их временной структуры, доплеровских флуктуаций, угловых шумов.

### **Внедрение результатов работы**

Результаты исследования внедрены при выполнении договора с АО «ЗАСЛОН». На их основе был разработан программный модуль, вошедший в состав программного обеспечения имитатора радиосигналов, используемого для проведения полунатурных испытаний РЛС.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации результаты исследований получены автором лично. Из 15 опубликованных работ 12 написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, относящиеся к тематике работы результаты получены автором лично.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях:

Science. Research. Practice: Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 22 дек. 2016 г.; Наука. Промышленность. Оборона: труды XVIII Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г.; XIV международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018)», Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.; ДНИ НАУКИ НГТУ-2018: Материалы научной студенческой конференции (итоги научной работы студентов за 2017–2018 гг.); Science. Research. Practice: II Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 20 дек. 2018 г.; The XIX International Conference of Young Specialists on Micro/nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2018: proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018; Наука. Промышленность. Оборона: XX Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 17–19 апр. 2019 г.;

I International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020.; The XXII International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, EDM 2021: proc., Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2021.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 15 работ, среди них: 5 статей – в журналах, рекомендованных ВАК и 4 работы – в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science или Scopus.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 178 наименований и 1 приложения. Диссертация изложена на 147 страницах текста. Работа содержит 14 таблиц и 21 рисунок.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

Кратко рассмотрены характеристики угловых шумов распределенных объектов радиолокации, механизм их появления и важность явления для задач радиолокации, а также приведены критерии достоверности моделирования. Отмечено, что для моделирования угловых шумов традиционно обеспечивают их ПРВ и спектрально-корреляционные характеристики.

Показано, что наиболее удобными для моделирования угловых шумов являются матричные имитаторы, принцип работы которых базируется на малоточечных геометрических моделях замещаемых объектов.

Приведен краткий обзор известных видов малоточечных геометрических моделей распределенных объектов радиолокации, отличающихся коррелированностью сигналов, подводимых к излучателям моделей. Указаны недостатки когерентных и некогерентных моделей по сравнению с частично когерентными. Для когерентных моделей это повышенные требования к точности фазировки сигналов, подводимых к излучателям. Недостаток некогерентных

моделей – ограниченный диапазон обеспечиваемых значений параметров ПРВ угловых шумов, что приводит к увеличению необходимого количества антенн матричного имитатора.

Отмечено, что для двухточечной частично когерентной модели можно подобрать эквивалентную ей трехточечную неэквидистантную модель, обеспечивающую заданные параметры ПРВ угловых шумов.

Переход от некогерентной к частично когерентной модели основан на том, что каждый из коррелированных сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , излучаемых частично когерентной моделью, можно представить в виде суммы двух компонент. Одна из компонент,  $u_0(t)$ , является общей для двух сигналов, вторая компонента,  $u_1(t)$  или  $u_2(t)$  – случайной добавкой. При формировании двух сигналов с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции происходит сложение общей и случайной компонент со своими весами – среднеквадратическими отклонениями (СКО):  $n_1A_1$ ,  $n_2A_2$  и  $U_1$ ,  $U_2$ :

$$\begin{cases} \sigma_1 s_1(t) = n_1 A_1 u_0(t) + U_1 u_1(t); \\ \sigma_2 s_2(t) = n_2 A_2 u_0(t) + U_2 u_2(t), \end{cases}$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – знаковые множители, принимающие значения 1 или  $-1$  в зависимости от знака при коэффициенте корреляции  $r$  между сигналами  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ . СКО сигналов, излучаемых частично когерентной моделью, равно  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно.

Таким образом, двухточечную частично когерентную модель можно представить в виде суммы двухточечной когерентной и двухточечной некогерентной моделей, которые являются виртуальными. К двухточечной когерентной модели относятся составляющие  $n_1 A_1 u_0(t)$  и  $n_2 A_2 u_0(t)$ . Эти излучаемые сигналы образуют точечный КЦИ, координата которого определяется отношением СКО излучаемых сигналов.

Сигнал, излучаемый КЦИ:  $U_3u_0(t) = n_1A_1u_0(t) + n_2A_2u_0(t)$ , где  $U_3 = n_1A_1 + n_2A_2$  – СКО суммарного сигнала виртуальной когерентной модели.

К виртуальной двухточечной некогерентной модели относятся составляющие  $U_1u_1(t)$  и  $U_2u_2(t)$ . Расположение точек такой модели совпадает с расположением точек исходной частично когерентной модели. Первая точка излучает сигнал  $U_1u_1(t)$ , вторая –  $U_2u_2(t)$ .

Рассматривая суперпозицию когерентной и некогерентной моделей, получаем трехточечную некогерентную геометрическую модель. Третий источник при этом является виртуальным. Схематично структура перехода показана на рис. 1.

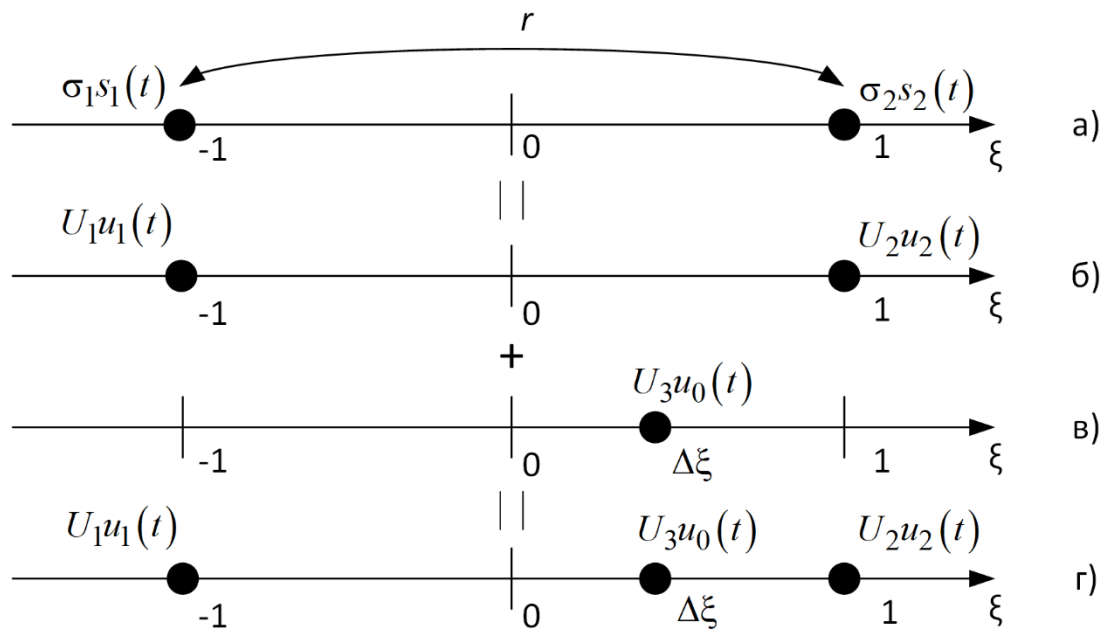


Рисунок 1 – Переход от двухточечной частично когерентной модели к трехточечной некогерентной

Параметры ПРВ угловых шумов, обеспечиваемых такой трехточечной некогерентной моделью и двухточечной частично когерентной, равны, что означает эквивалентность этих моделей.

Предложено использовать свойство эквивалентности для описания способа синтеза частично когерентных геометрических моделей на основе некогерентных.

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

**Второй раздел** посвящен разработке математического аппарата синтеза частично когерентных моделей на основе эквивалентных им некогерентных моделей, обеспечивающих требуемые значения параметров ПРВ угловых шумов.

Определены границы эквивалентности некогерентных и частично когерентных моделей. Показано, что синтез частично когерентной модели на основе некогерентной возможен даже в том случае, если некогерентная модель, обеспечивающая требуемые значения параметров ПРВ угловых шумов, является физически нереализуемой.

Установлено, что одномерной двухточечной частично когерентной модели соответствует бесконечное множество эквивалентных ей одномерных трехточечных неэквидистантных некогерентных моделей, обеспечивающих требуемые значения параметров ПРВ угловых шумов.

Показана эквивалентность двумерной четырехточечной частично когерентной и двумерной пяти- и девятиточечной неэквидистантных некогерентных моделей с точки зрения обеспечиваемых ими параметров ПРВ угловых шумов.

Эквивалентность двумерных некогерентных и частично когерентных моделей обеспечивается в том случае, если эквивалентны их одномерные модели-проекции на ортогональные оси координат. Схемы эквивалентных моделей приведены на рис. 2 и 3, где введены следующие обозначения: белыми маркерами-кругами обозначены точки двумерных моделей; черными маркерами-кругами – точки проекций частично когерентной модели на оси координат; черными маркерами-квадратами – точки проекций некогерентных моделей на оси координат; СКО сигналов, подводимых к точкам частично когерентных моделей, –  $\sigma_1 \dots \sigma_4$ ; СКО сигналов, подводимых к точкам проекций частично когерентной модели, –  $\sigma_{x1}$ ,  $\sigma_{x2}$  и  $\sigma_{y1}$ ,  $\sigma_{y2}$ ; СКО сигналов, подводимых к точкам некогерентных моделей, –  $U_1 \dots U_5$  для пятиточечной модели и  $U_1 \dots U_9$  для

девятиточечной; СКО сигналов, подводимых к точкам проекций некогерентных моделей,  $-U_{x1}, U_{x2}, U_{x3}$  и  $U_{y1}, U_{y2}, U_{y3}$ .

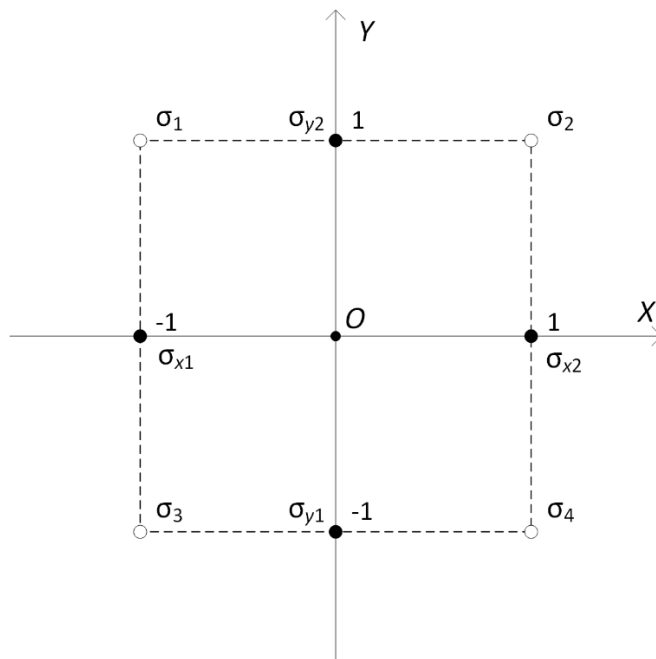


Рисунок 2 – Двумерная частично когерентная модель и ее проекции на оси координат  $OX$  и  $OY$

Приведено краткое сравнение пяти- и девятиточечных некогерентных моделей как основы для последующего синтеза четырехточечных частично когерентных. Отмечен недостаток пятиточечной некогерентной модели, заключающийся в ограничении независимого регулирования параметров ПРВ угловых шумов вдоль двух ортогональных осей координат. Получены выражения, определяющие границы возможного значения координат пятого подвижного излучателя пятиточечной некогерентной модели, в пределах которых модель обеспечивает заданные параметры ПРВ угловых шумов.

Получены аналитические соотношения, позволяющие синтезировать четырехточечную частично когерентную модель, обеспечивающую требуемые параметры ПРВ угловых шумов, на основе известной пяти- или девятиточечной некогерентной модели.

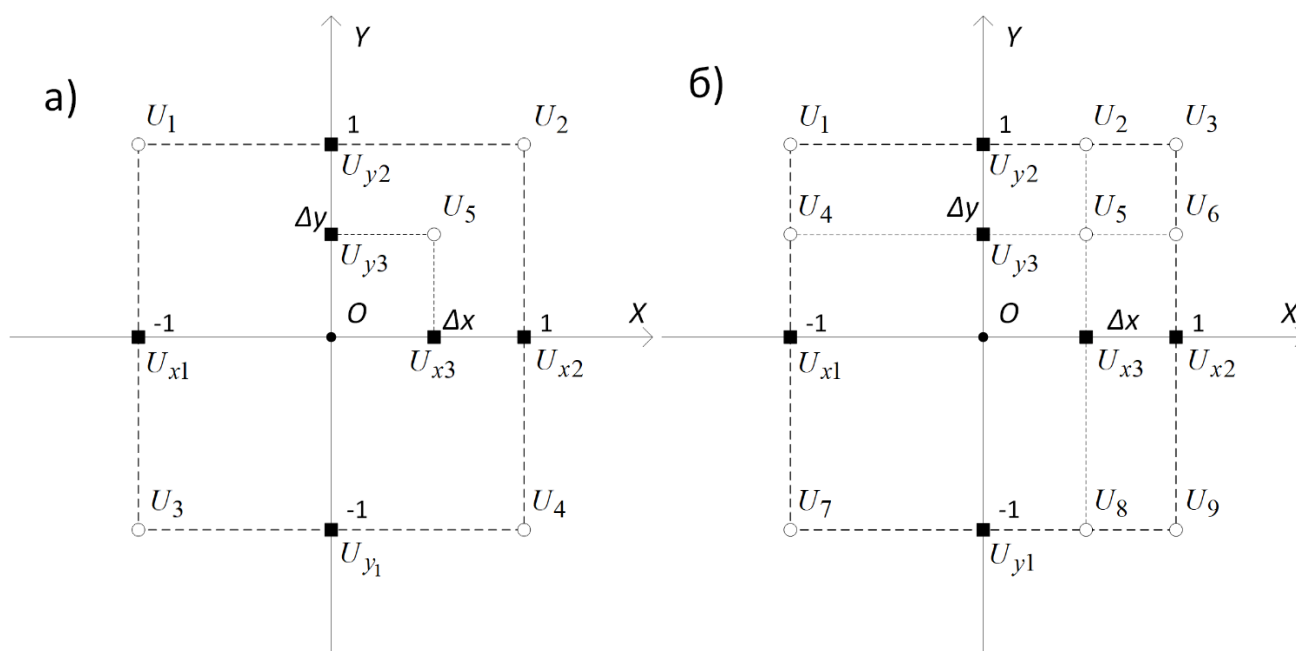


Рисунок 3 – Двумерные некогерентные модели и их проекции на оси координат  $OX$  и  $OY$

В третьем разделе описан способ синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих требуемые спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов, на основе эквивалентных некогерентных моделей.

Получены аналитические соотношения, позволяющие на основе известных корреляционных функций квадратурных компонент сигналов, подводимых к точкам одномерной трехточечной неэквидистантной некогерентной модели, определить соответствующие корреляционные функции для сигналов, подводимых к точкам одномерной двухточечной частично когерентной модели. Получены аналитические соотношения, позволяющие осуществить подобный переход для двумерных моделей: четырехточечной частично когерентной и пяти- и девятиточечной некогерентной.

Показано, что способ перехода от некогерентной модели к частично когерентной заключается в перераспределении сигналов, подводимых к некоторым точкам некогерентной модели, по остальным точкам. Выбор точек зависит от требуемых спектрально-корреляционных характеристик угловых шумов вдоль ортогональных осей координат. Схема перераспределения сигналов



для перехода от пятиточечной некогерентной модели к четырехточечной частично когерентной приведена на рис. 4.

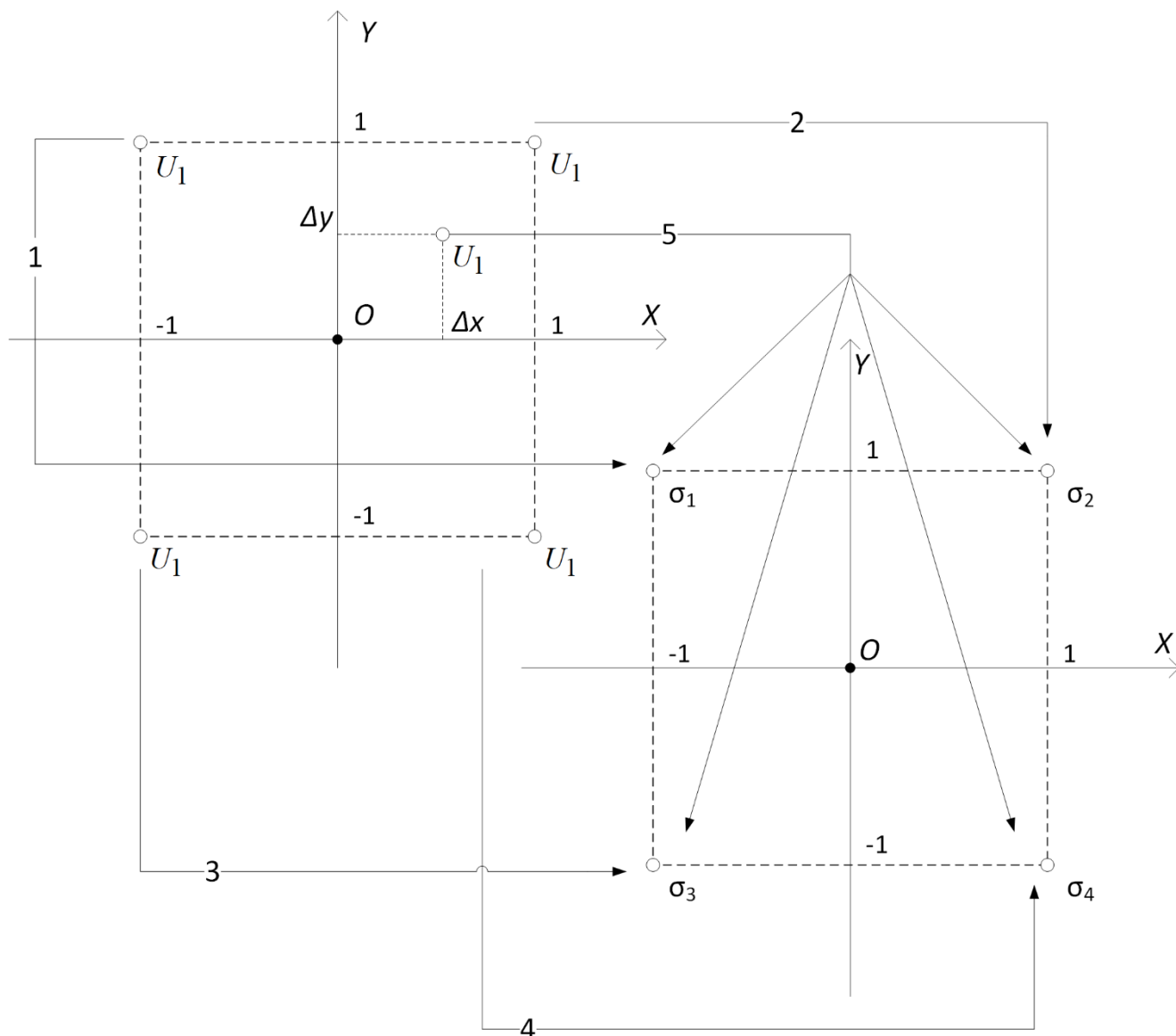


Рисунок 4 – Схема перераспределения мощностей сигналов, излучаемых пятиточечной некогерентной моделью, при переходе к четырехточечной частично когерентной модели

В четвертом разделе рассмотрен синтез четырехточечной частично когерентной модели метеообразования как пример практического применения полученных в других разделах теоретических результатов.

Разработан алгоритм синтеза частично когерентной модели метеообразования. В краткой форме алгоритм представляет собой следующий

набор шагов: синтез многоточечной геометрической модели метеообразования с последующим переходом к малоточечной некогерентной модели и к малоточечной частично когерентной. Для этого были рассмотрены свойства метеообразования, влияющие на характеристики угловых шумов: форма, распределение отражательной способности и распределение скоростей ветра.

Для синтеза многоточечной (стартовой) модели метеообразования (МО) представляется совокупностью парциальных объемов так, как показано на рис. 5. Для каждого парциального объема задаются отражаемая мощность  $\sigma_{i,k,p}^2$ , вектор средней скорости ветра  $\vec{v}_{0i,k,p}$  и вектор СКО разброса скоростей  $\overline{\Delta v}_{i,k,p}$  во взаимно ортогональных осях координат.

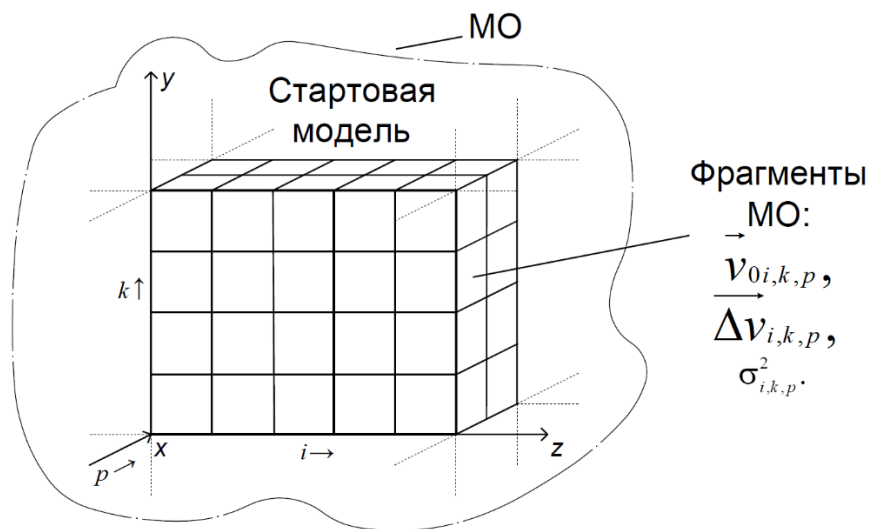


Рисунок 5 – Замещение метеообразования стартовой многоточечной моделью

Некогерентная модель синтезируется на основе стартовой с целью замещения области распределенного объекта, попадающей в элемент разрешения РЛС так, как показано штриховкой на рис. 6 на примере девятиточечной некогерентной модели. Параметры  $m_\varphi$  и  $m_\theta$  имеют смысл математического ожидания угловых шумов для азимутальной и угломестной осей соответственно. Частично когерентная модель синтезируется на основе некогерентной по выражениям, полученным в разделах 2 и 3.

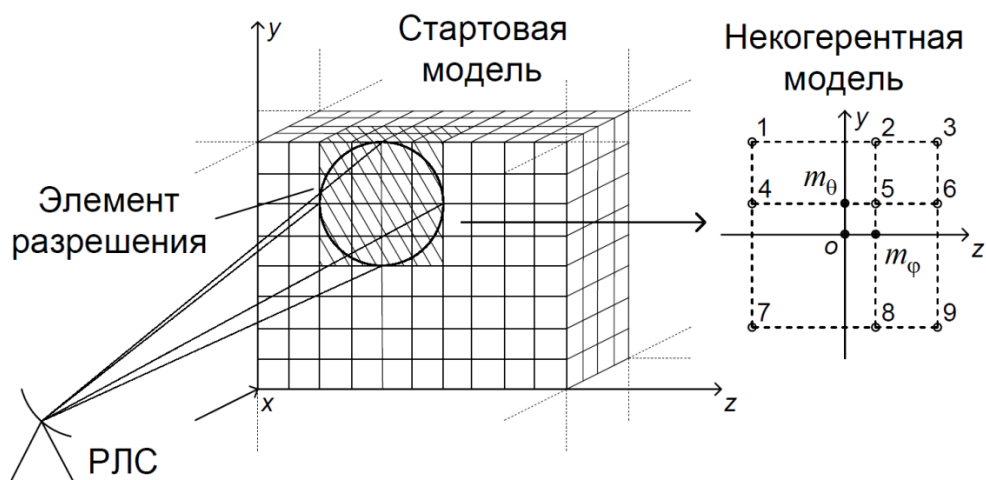


Рисунок 6 – Замещение элемента разрешения малоточечной некогерентной моделью

На основе полученных результатов разработан программный модуль, вошедший в состав программного обеспечения имитатора радиолокационных сигналов. Приведено его краткое описание.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

В **приложении** представлен акт о внедрении основных результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе обоснован метод синтеза частично когерентных геометрических моделей распределенных объектов радиолокации на основе некогерентных малоточечных моделей, известных для этих объектов.

1. Определены границы эквивалентности частично когерентных и некогерентных моделей через диапазоны допустимых значений их параметров, при которых эти модели обеспечивают заданные параметры ПРВ угловых шумов.

2. Доказана эквивалентность двумерной четырехточечной частично когерентной модели и пяти- или девятиточечной неэквидистантной некогерентной, которая заключается в тождественности обеспечиваемых этими моделями параметров ПРВ и спектрально-корреляционных характеристик угловых шумов.

3. Получены соотношения, позволяющие осуществить переход от некогерентной модели к эквивалентной ей частично когерентной модели, обеспечивающей требуемые спектрально-корреляционные характеристики и ПРВ угловых шумов: от трехточечной неэквидистантной некогерентной к двухточечной частично когерентной – для одномерного исполнения, и от пяти- или девятиточечной неэквидистантной некогерентной к четырехточечной частично когерентной – для двумерного исполнения.

4. Установлено, что система выражений, связывающая параметры моделей, является переопределенной. Это означает, что одной частично когерентной модели соответствует бесконечное количество эквивалентных ей некогерентных моделей. Это свойство подтверждает и демонстрирует, что частично когерентные модели обладают большими возможностями по управлению характеристиками угловых шумов, чем некогерентные.

Полученные теоретические результаты имеют практическую значимость и могут быть применены в имитаторах радиосигналов с целью полунатурного моделирования пространственно распределенных объектов радиолокации.

1. Обоснован метод, позволяющий синтезировать малоточечную частично когерентную модель распределенного объекта радиолокации на основе его известной многоточечной модели или малоточечной некогерентной модели. Применение частично когерентной модели позволит сократить количество излучающих точек матричного имитатора до двух – для радиолокационных объектов, распределенных по одной угловой координате, и четырех – для радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам.

2. Разработан алгоритм замещения метеообразования двумерной четырехточечной частично когерентной моделью. Он позволяет синтезировать четырехточечную частично когерентную модель, формирующую отражения от замещаемого метеообразования с учетом их временной структуры, доплеровских флуктуаций, угловых шумов. Входящие в состав алгоритма соотношения определяют связь мощности сигналов, подводимых к точкам некогерентной и

частично когерентной моделей, а также коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых точками частично когерентной модели, и их собственные спектрально-корреляционные свойства.

Полученные в работе результаты дают основание утверждать, что решена задача, имеющая существенное значение для синтеза матричных имитаторов, входящих в состав систем полунатурного моделирования распределенных объектов радиолокации.

Теоретические результаты развиты до уровня их практического применения: разработан алгоритм синтеза частично когерентной модели распределенного объекта радиолокации на основе его известной многоточечной или малоточечной некогерентной модели.

Дальнейшие научные исследования могут быть направлены на применение разработанного алгоритма для синтеза различных частично когерентных моделей распределенных объектов радиолокации.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

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

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

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

4. Подкопаев А. О., Степанов М. А., Тырыкин С. В. Определение параметров четырехточечной частично когерентной модели радиолокационного

объекта на основе ее эквивалентности пятиточечной некогерентной модели // Радиопромышленность. – 2019. – № 4. – С. 35–43.

5. 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 делимостью пространственной и временной координат // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. – 2019. – № 4. – С. 16–21.

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

1. Podkopyayev A. O., Kiselev A. V., Stepanov M. A. Evaluation and compensation of systematic errors of matrix simulator calibration // The 19 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2018 : proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 156–159.

2. Podkopyayev A. O. Stepanov M. A. The algorithm of the two-dimensional partially coherent model synthesis of the moisture target based on its multipoint geometrical starting model // 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020. – Novosibirsk : IEEE, 2020. – P. 17–22.

3. Podkopyayev A. O., Stepanov M. A. The application of the method of the square four-point partially coherent model of the volume distributed object synthesis based on its multipoint model // IEEE 22 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk : IEEE, 2021. – P. 208–213.

4. Podkopyayev A. O., Stepanov M. A., Kiselev A. V. Synthesis of partially coherent geometric models of radar objects based on their incoherent models // Radio Science, 56, e2021RS007274. – 24 November 2021. <https://doi.org/10.1029/2021RS007274>.

### **Публикации в других научных изданиях:**

1. Podkopaev A. Density parameters modeling of angle noise probability function // Science. Research. Practice : тез. Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 22 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 133–134.

2. Подкопаев А. О., Степанов М. А. Моделирование параметров плотности распределения вероятностей шумов координат // Наука. Промышленность. Оборона : тр. XVIII Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 269–274.

3. Подкопаев А. О., Степанов М. А. Границы области эквивалентности двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной моделей // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) : тр. XIV междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 4. – С. 222–226.

4. Подкопаев А. О. Об эквивалентности двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной геометрической модели // ДНИ НАУКИ НГТУ–2018 : Материалы научной студенческой конференции (итоги научной работы студентов за 2017–2018 гг.): Под редакцией Е.А. Хайленко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – С. 153–157.

5. Подкопаев А. О., Степанов М. А. Эквивалентность четырехточечной частично когерентной и пятиточечной некогерентной моделей распределенного объекта // Наука. Промышленность. Оборона : тр. XX Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 17–19 апр. 2019 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Т. 2. – С. 264–269.

6. Podkopaev A. O. A Two-Point Partially Coherent Model of the Echoed Signals from Distributed Object Decomposition // Science. Research. Practice: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 20 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 175–176.

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 \_\_\_\_ экз.  
Заказ \_\_\_\_\_. Подписано в печать \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 202\_ г.