

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Новосибирский государственный технический университет

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н, доцент Степанов М.А.

Томск – 2022

## Содержание

Список сокращений .....	4
Введение .....	5
1. Геометрические модели распределенных объектов радиолокации .....	17
1.1. Угловые шумы протяженных объектов радиолокации .....	17
1.2. Многоточечные геометрические модели РЛО .....	25
1.3. Когерентные малоточечные геометрические модели РЛО .....	26
1.4. Некогерентные малоточечные геометрические модели РЛО .....	30
1.5. Частично когерентные малоточечные геометрические модели РЛО .....	33
1.6. Эквивалентность одномерной двухточечной частично когерентной модели и неэквилистантной трехточечной некогерентной .....	36
1.7. Основные задачи исследования .....	41
1.8. Заключение по первому разделу .....	42
2. Синтез частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов .....	44
2.1. Границы эквивалентности моделей .....	45
2.2. Эквивалентность двумерных частично когерентных и некогерентных моделей .....	48
2.3. Программное моделирование .....	59
2.4. Сравнение пятиточечной и девятиточечной некогерентных моделей ...	64
2.5. Заключение по второму разделу .....	66
3. Синтез частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов .....	68

3.1. Определение СКХ для одномерных моделей .....	69
3.2. Определение СКХ для двумерных моделей .....	75
3.3. Программное моделирование .....	92
3.4. Заключение по третьему разделу .....	96
4. Практическое применение полученных результатов и их экспериментальная апробация .....	98
4.1. Алгоритм синтеза четырехточечной частично когерентной модели метеообразования .....	101
4.2. Синтез стартовой модели .....	103
4.3. Синтез некогерентной модели .....	115
4.4. Синтез частично когерентной модели .....	118
4.5. Пример синтеза частично когерентной модели метеообразования .....	119
4.6. Заключение по четвертому разделу .....	124
Заключение .....	126
Список литературы .....	128
Приложение 1 .....	147

## Список сокращений

АКФ – автокорреляционная функция

ВКФ – взаимная корреляционная функция

ДСК – декартова система координат

КФ – корреляционная функция

КЦИ – кажущийся центр излучения

МИ – матричный имитатор

МО – метеообразование

ПРВ – плотность распределения вероятностей

РЛО – объект радиолокации

РЛС – радиолокационная станция

СКО – среднеквадратическое отклонение

СКХ – спектрально-корреляционные характеристики

СПМ – спектральная плотность мощности

УШ – угловые шумы

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

## Введение

### Актуальность темы

В процессе разработки и производства современных радиолокационных систем (РЛС) большую значимость имеет этап проверки разрабатываемой системы на правильность выполнения поставленных задач [1–10]. Можно выделить несколько основных видов испытаний РЛС: математическое моделирование, полунатурное моделирование и натурное [11–15]. В настоящее время широкое распространение получило полунатурное моделирование [16–25], 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 [17,21,26–30]. Испытуемое устройство осуществляет прием и обработку сформированных имитаторами эхо-сигналов от смоделированного объекта радиолокации [26–36]. Такой подход считается наиболее полным и достоверным, так как обеспечивает возможность проверки как антенной части РЛС, так и последующих блоков обработки сигналов [23,34].

Основными задачами радиолокации являются: обнаружение, распознавание, сопровождение и определение различных параметров объекта радиолокации (цели) с помощью радиоволн [23,37–39]. 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. [23,39–40]. 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. [41–43]. 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 [38,41–45].

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., Pfeiffer I., Dunn J. H., Howard D. D. и др. [31,41–52].

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 [38,41–58], например, на фоне таких источников пассивных помех, как метеообразования, облака дипольных отражателей, фрагменты земной поверхности и др. [38,41,56,58–60]. 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 [38,41,61–65]. 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 [41,42,63]. 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 [41,63,66,67]. 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 [62,63]), синтезируются на основе многоточечных и

замещают только ту область распределенного объекта, которая попала в рассматриваемый элемент разрешения РЛС [41,62,63,68].

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 [62,63]. 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 [41,62,63]. 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 [41,63, 69–71].

Когерентные модели излучают сигналы с коэффициентом взаимной корреляции, равным 1, что предъявляет высокие 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 [72–74]. Исторически когерентные модели появились раньше двух других видов. Такие модели излучали детерминированные сигналы, а положение КЦИ регулировалось путем

управления амплитудами и фазами излучаемых сигналов [75–77]. 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 [41,62]. 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 неэквилистантных некогерентных моделей, достоверно замещающих отражения от одномерных распределенных объектов, а также пяти- и девятиточечных двумерных неэквилистантных моделей, замещающих отражения от двумерных распределенных объектов и допускающих независимое регулирование параметров ПРВ и спектрально-корреляционных характеристик угловых шумов вдоль двух ортогональных осей координат [62,69,78–79]. 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 [62,63,69,70].

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 [63,80–85]. 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 [63].

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. Отмечены 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 двуточечной частично когерентной модели можно подобрать эквивалентную ей трехточечную неэквидистантную модель, обеспечивающую заданные параметры ПРВ угловых шумов.

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.

Приведено краткое сравнение пяти- и девятиточечных некогерентных моделей как основы для последующего синтеза четырехточечных частично когерентных моделей. 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.

**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.

**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.

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.



## **1. Геометрические модели распределенных объектов радиолокации**

В первом разделе приводится описание явления угловых шумов объектов радиолокации, имеющих распределение по угловым координатам. Приведены основные характеристики трех видов малоточечных моделей, используемых для замещения таких объектов. Отмечается, что в настоящее время имеется большое количество синтезированных некогерентных моделей, достоверно замещающих протяженные объекты радиолокации с учетом угловых шумов. Показано, что частично когерентные модели обладают рядом преимуществ по сравнению с некогерентными. Показана эквивалентность одномерных частично когерентных и некогерентных моделей. В заключении к разделу сформулированы основные задачи исследования.

### **1.1. Угловые шумы протяженных объектов радиолокации**

Для РЛС любой объект радиолокации можно представить множеством малых отражающих фрагментов, заключенных в области пространства, ограниченной размерами объекта [38,41,42,86,87]. Эти фрагменты называются отражающими или «блестящими» точками. Отражающие свойства и свойства движения каждого из этих фрагментов определяют амплитуды и спектрально-корреляционные характеристики эхо-сигналов [38,41,63]. Т.к. фрагменты объекта радиолокации разнесены в пространстве, то эхо-сигналы от разных блестящих точек считаются статистически независимыми [38,41,42,63].

Измерение угловых координат и параметров движения объекта радиолокации (РЛО) производится путем оценки характеристик совокупности эхо-сигналов от этого объекта, наблюдаемых в точке приема [10,38,88–90]. Если в пределах элемента разрешения РЛС можно выделить несколько областей, формирующих независимые отражения, то сумма эхо-сигналов от такого объекта представляет собой нормальный случайный процесс [38,41,42]. Форма доплеровского спектра суммарного сигнала в точке приема определяется относительными скоростями движения РЛС и блестящих точек объекта радиолокации. Мощность суммарного эхо-сигнала в точке приема зависит от

отражательных способностей, соответствующих блестящим точкам объекта [10,38,42,90–97].

Фрагменты объекта, попадающие в один элемент разрешения РЛС, не разрешаются ее приемной антенной и формируют единственный кажущийся источник излучения, называемый кажущимся центром излучения или КЦИ. Результат пеленга КЦИ определяется мгновенными значениями суммы эхо-сигналов в точке приема [41,98–100]. Т.к. сумма эхо-сигналов от объекта является случайным процессом, то результат пеленга такого объекта также является случайным. Это явление называется угловыми шумами (УШ) и свойственно работе с реальными объектами радиолокации [38, 41–58].

Традиционно считается, что УШ являются стационарными на интервале времени наблюдения РЛО. Таким образом, для описания угловых шумов применяют их плотность распределения вероятности (ПРВ) и автокорреляционную функцию (АКФ) [41,62,63,101]. ПРВ угловых шумов определяет наблюдаемые размеры объекта, а АКФ – характер флуктуаций КЦИ во времени.

ПРВ угловых шумов имеет вид, схожий с законом распределения Стьюдента с двумя степенями свободы, и описывается математическим выражением (1.1.1) [41].

$$w(\xi) = \frac{\mu}{2\left(1 + \mu^2(\xi - m)^2\right)^{3/2}}, \quad (1.1.1)$$

где  $\xi$  - обобщенная угловая координата положения КЦИ,  $m$  - ее математическое ожидание, а  $\mu$  - параметр, обратно пропорциональный ширине ПРВ. Угловые координаты, соответствующие границам элемента разрешения РЛС  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ .

Как видно по выражению (1.1.1), ПРВ угловых шумов полностью определяется двумя ее параметрами:  $m$  и  $\mu$ .

Графики зависимости  $w(\xi, m, \mu)$  для различных значений параметров ПРВ приведены на рис. 1.1.1.

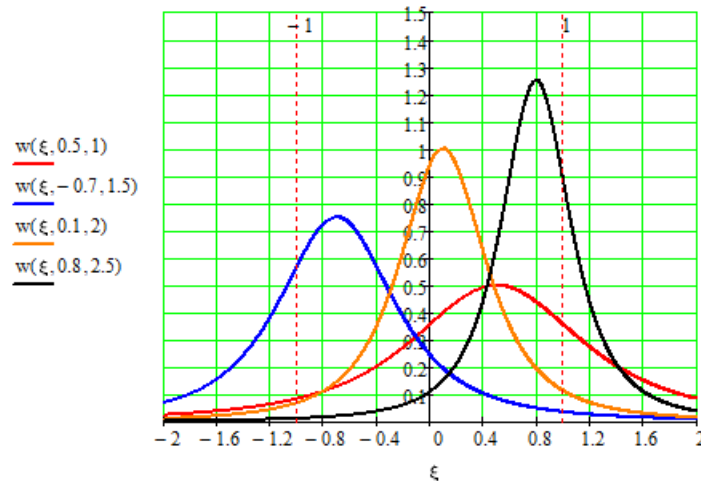


Рисунок 1.1.1 – ПРВ угловых шумов при различных значениях  $t$  и  $\mu$

Параметры ПРВ угловых шумов зависят от свойств объекта радиолокации: отражательной способности фрагментов, попавших в элемент разрешения РЛС, формы объекта и др. По рис. 1.1.1 видно, что результат пеленга РЛО может существенно выходить за границы элемента разрешения РЛС, соответствующих  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ . Т.е. могут существенно отличаться реальные и наблюдаемые размеры объекта радиолокации.

На основании соответствия реальных и наблюдаемых размеров РЛО применяется следующая классификация [41,62,102–103].

Сосредоточенным считается РЛО, реальные размеры которого намного меньше или соизмеримы с размерами элемента разрешения РЛС [41,103–105]. Простейшим случаем сосредоточенного РЛО является простая или точечная цель, для которой можно пренебречь свойствами ее геометрической формы. Такой объект для РЛС представляется одной блестящей точкой. Амплитуда эхо-сигнала зависит от эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) цели, а его спектрально-корреляционные характеристики – от вектора скорости движения цели относительно РЛС [38,41,103–106]. Исследования в области математического и полунатурного моделирования точечных объектов радиолокации в настоящее время обширно представлены в литературе [38,103,107–108].

Сложными сосредоточенными целями называют объекты, для которых нельзя пренебречь свойствами их геометрической формы. К таким целям относят объекты, размеры которых соизмеримы с размерами элемента разрешения РЛС. Примерами сложных целей являются группы точечных целей, протяженные летательные аппараты, суда строения и др. [38,41,108–109]. В [41] рекомендуется считать сложными те сосредоточенные цели, для которых ошибки определения угловых координат могут выходить за пределы элемента разрешения РЛС.

Распределенным считается РЛО, размеры которого существенно превышают размеры элемента разрешения РЛС. Распределенные радиолокационные объекты подразделяются на поверхностно и объемно распределенные [38,40–41]. К поверхностно распределенным можно отнести земную и водную поверхность, а к объемно распределенным – например, метеообразования и облака дипольных отражателей [38,41,107]. Распределенные РЛО можно рассматривать как совокупность сложных целей. Каждая из таких сложных целей является областью распределенного объекта, попавшей в соответствующий элемент разрешения РЛС. При таком подходе разница между распределенным объектом и одиночной сложной целью состоит только в количестве рассматриваемых отражающих точек. С учетом вышесказанного далее в работе будем называть распределенным любой РЛО, для которого ошибки определения угловых координат могут выходить за пределы элемента разрешения РЛС.

При моделировании распределенных объектов радиолокации необходимо обеспечить ряд свойств и характеристик замещаемого РЛО. Эти свойства и характеристики можно разделить на две категории: традиционно моделируемые свойства объекта и угловые шумы. К традиционно моделируемым свойствам объекта относятся: отражательная способность, поляризационные свойства, форма доплеровского спектра и др. [38,41–42,63]. При моделировании угловых шумов необходимо обеспечить флуктуации КЦИ с ПРВ и АКФ, соответствующими ПРВ и АКФ угловых шумов [41,63].

Вопросы достоверного моделирования традиционных свойств и характеристик распределенных объектов достаточно полно рассмотрены в литературе [38,39,91,94,109–115]. Более сложной и менее освещенной задачей является моделирование распределенных РЛО с учетом угловых шумов. Рассмотрим основные подходы к такому моделированию более подробно.

При моделировании объемно распределенных объектов радиолокации часто [41,62,63,103] применяют функции распределения авто- и взаимной (ВКФ) корреляционной функции квадратурных компонент эхо-сигналов по объекту  $F_r(x, y, z, \tau)$  и  $F_s(x, y, z, \tau)$ . Функция  $F_r(x, y, z, \tau)$  – распределение АКФ одноименных квадратурных компонент эхо-сигналов по объекту, а  $F_s(x, y, z, \tau)$  – распределение ВКФ разноименных квадратурных компонент. Следует обратить внимание на то, что здесь и далее в работе рассматриваются эхо-сигналы, наблюдаемые в точке приема РЛС.

Эти функции определяются следующим образом:

$$\begin{cases} F_r(x, y, z, \tau) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \langle I(x, y, z, t) \cdot I(x, y, z, t + \tau) \rangle = \\ = \langle Q(x, y, z, t) \cdot Q(x, y, z, t + \tau) \rangle; \\ F_s(x, y, z, \tau) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \langle I(x, y, z, t) \cdot Q(x, y, z, t + \tau) \rangle = \\ = -\langle Q(x, y, z, t) \cdot I(x, y, z, t + \tau) \rangle, \end{cases} \quad (1.1.2)$$

где  $I(x, y, z, t)$  и  $Q(x, y, z, t)$  – соответственно синфазная и квадратурная компоненты эхо-сигнала, отраженного от точки с декартовыми координатами  $(x, y, z)$ , располагающейся в центре малого отражающего фрагмента объекта – элементарного объема – с линейными размерами  $dx$ ,  $dy$  и  $dz$ , а  $\langle \rangle$  – операция усреднения по множеству.

По сути, функции  $F_r(x, y, z, \tau)$  и  $F_s(x, y, z, \tau)$  определяют мощности и спектрально-корреляционные характеристики эхо-сигналов, отраженных от блестящих точек объекта, располагающихся в соответственных координатах.

При  $\tau=0$  функция  $F_r(x, y, z, 0)$  становится функцией распределения интенсивности эхо-сигналов по объекту, а  $F_s(x, y, z, 0) = 0$ . Тогда можно записать

выражение для определения в общем случае комплексной суммы эхо-сигналов в точке приема  $\dot{i}(t)$  на основе (1.1.2) следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{i}(t) = & \iiint_{x y z} \sqrt{F_r(x, y, z, 0)} \cdot I(x, y, z, t) dx dy dz + \\ & + j \iiint_{x y z} \sqrt{F_r(x, y, z, 0)} \cdot Q(x, y, z, t) dx dy dz, \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

где  $j$  – мнимая единица.

Для упрощения записи, рассмотрим далее объект, распределенный вдоль обобщенной декартовой координаты  $\xi$ . Опишем формируемые им угловые шумы.

Определим для РЛО ПРВ угловых шумов на основе функций  $F_r(\xi, \tau)$  и  $F_s(\xi, \tau)$ .

Математическое ожидание  $m_\xi$  определяется, согласно [41], по выражению (1.1.4) и не зависит от переменной  $t$ .

$$m_\xi = \frac{\int_{\xi} \xi F_r(\xi) d\xi}{\int_{\xi} F_r(\xi) d\xi}. \quad (1.1.4)$$

Параметр  $\mu_\xi$ , согласно [41], определяется по выражению (1.1.5).

$$\mu_\xi = \frac{\sigma_H}{\sigma_B}, \quad (1.1.5)$$

где  $\sigma_H^2$  имеет смысл дисперсии суммы эхо-сигналов от всего объекта в точке приема, а  $\sigma_B^2$  – дисперсии суммы эхо-сигналов с учетом удаленности положения отражающих точек от математического ожидания  $m_\xi$ . Параметры  $\sigma_H^2$  и  $\sigma_B^2$  определяются, согласно [41], выражениями (1.1.6) и (1.1.7) соответственно.

$$\sigma_H^2 = \int_{\xi} F_r(\xi) d\xi. \quad (1.1.5)$$

$$\sigma_B^2 = \int_{\xi} (\xi - m_\xi)^2 F_r(\xi) d\xi. \quad (1.1.6)$$

В выражении (1.1.7) определен параметр  $\sigma_{BH}^2$ , имеющий смысл дисперсии суммы эхо-сигналов в точке приема с учетом расположения отражающих точек относительно  $m_\xi$ .

$$\sigma_{BH}^2 = \int_{\xi} (\xi - m_\xi) F_r(\xi) d\xi. \quad (1.1.7)$$

Корреляционные функции квадратурных компонент эхо-сигналов, согласно [41], определяются по выражениям (1.1.8) – (1.1.10).

$$\begin{cases} R_H(\tau) = \int_{\xi} F_r(\xi, \tau) d\xi = \sigma_H^2 r_H(\tau); \\ S_H(\tau) = \int_{\xi} F_s(\xi, \tau) d\xi = \sigma_H^2 s_H(\tau). \end{cases} \quad (1.1.8)$$

$$\begin{cases} R_B(\tau) = \int_{\xi} (\xi - m_\xi)^2 F_r(\xi, \tau) d\xi = \sigma_B^2 r_B(\tau); \\ S_B(\tau) = \int_{\xi} (\xi - m_\xi)^2 F_s(\xi, \tau) d\xi = \sigma_B^2 s_B(\tau). \end{cases} \quad (1.1.9)$$

$$\begin{cases} R_{BH}(\tau) = \int_{\xi} (\xi - m_\xi) F_r(\xi, \tau) d\xi = \sigma_{BH}^2 r_{BH}(\tau); \\ S_{BH}(\tau) = \int_{\xi} (\xi - m_\xi) F_s(\xi, \tau) d\xi = \sigma_{BH}^2 s_{BH}(\tau). \end{cases} \quad (1.1.10)$$

Функции  $R_H(\tau)$  и  $S_H(\tau)$  имеют смысл АКФ и ВКФ квадратурных компонент эхо-сигналов соответственно. Функции  $R_B(\tau)$  и  $S_B(\tau)$  имеют смысл АКФ и ВКФ квадратурных компонент эхо-сигналов соответственно с учетом удаленности положения отражающих точек от математического ожидания  $m_\xi$ . Функции  $R_{BH}(\tau)$  и  $S_{BH}(\tau)$  имеют смысл АКФ и ВКФ квадратурных компонент эхо-сигналов соответственно с учетом расположения отражающих точек относительно  $m_\xi$ . Функции  $r_H(\tau)$ ,  $s_H(\tau)$ ,  $r_{BH}(\tau)$ ,  $s_{BH}(\tau)$ ,  $r_B(\tau)$  и  $s_B(\tau)$  имеют смысл формы соответствующей корреляционной функции.

АКФ угловых шумов определяется группой математических выражений (1.1.11) [41,62,63].

$$B_{\xi}(\tau) = D_1(\tau) + D_2(\tau) + D_3(\tau), \quad (1.1.11)$$

где:

$$D_1(\tau) = \frac{a_B(\tau)}{\mu^2 \cdot a_H(\tau)} \cos(\beta_H(\tau) - \beta_B(\tau)) \cdot \ln \left( \frac{1}{\sqrt{1 - a_H^2(\tau)}} \right);$$

$$D_2(\tau) = \frac{-a_{BH}(\tau)}{\mu^2 \cdot a_H(\tau)} \cos(2 \cdot \beta_H(\tau) - 2 \cdot \beta_{BH}(\tau)) \cdot \ln \left( \frac{1}{\sqrt{1 - a_H^2(\tau)}} \right);$$

$$D_3(\tau) = \frac{a_{BH}^2(\tau) \cdot \cos^2(\beta_H(\tau) - \beta_{BH}(\tau))}{\mu^2 (1 - a_H^2(\tau))}; \quad \beta_H(\tau) = \arctg \left( \frac{s_H(\tau)}{r_H(\tau)} \right);$$

$$\beta_{BH}(\tau) = \arctg \left( \frac{s_{BH}(\tau)}{r_{BH}(\tau)} \right); \quad \beta_B(\tau) = \arctg \left( \frac{s_B(\tau)}{r_B(\tau)} \right); \quad a_H(\tau) = \sqrt{r_H^2(\tau) + s_H^2(\tau)};$$

$$a_{BH}(\tau) = \sqrt{r_{BH}^2(\tau) + s_{BH}^2(\tau)}; \quad a_B(\tau) = \sqrt{r_B^2(\tau) + s_B^2(\tau)};$$

Достаточными условиями для достоверного моделирования угловых шумов традиционно является равенство обеспечиваемых моделью значений параметров ПРВ  $m_{\xi}$ ,  $\mu_{\xi}$  и значений корреляционной функции угловых шумов  $B_{\xi}(\tau)$  соответствующим значениям для реального распределенного объекта радиолокации [41,62–63]. Таким образом, для достоверного моделирования протяженного РЛО с учетом угловых шумов необходимо обеспечить следующее: распределение по объекту мощностей эхо-сигналов, формирующих в точке приема угловые шумы с требуемыми параметрами ПРВ  $m_{\xi}$  и  $\mu_{\xi}$ ; авто- и взаимные корреляционные функции квадратурных компонент этих эхо-сигналов, формирующих в точке приема угловые шумы с требуемой корреляционной функцией  $B_{\xi}(\tau)$ .

Модели распределенных объектов радиолокации, достоверно формирующие угловые шумы, находят широкое применение на практике. В настоящее время важным этапом производства и отладки радиотехнических систем, в т.ч. РЛС, является полунатурное моделирование [16–25]. При помощи



имитаторов радиосигналов в лабораторных условиях для РЛС обеспечивается радиоэлектронная обстановка, максимально приближенная к реальной. Наиболее полным и достоверным подходом является формирование электромагнитных полей на апертуре приемной антенны РЛС [26–36].

Большое распространение при таком подходе получили матричные имитаторы (МИ), представляющие собой жестко связанную систему излучателей, к которым подводятся сигналы с требуемыми характеристиками. МИ размещается в дальней зоне приемной антенны и формирует КЦИ, положение которого определяется комплексными амплитудами сигналов, подводимых к излучателям [35,62–63,71]. Матричные имитаторы синтезируются на основе математических моделей, замещающих распределенные объекты радиолокации. В настоящее время известно четыре вида математических моделей, применяемых с этой целью: многоточечные; малоточечные когерентные, некогерентные и частично когерентные. Виды применяемых моделей отличаются количеством точек (излучателей МИ), статистической связью между излучаемыми сигналами и некоторыми особенностями их практического применения.

## 1.2. Многоточечные геометрические модели РЛО

Известны многоточечные геометрические модели РЛО, достоверно замещающие весь объект большим количеством отражающих точек, разнесенных в пространстве с дискретным шагом [41–42]. Точки излучают сигналы с характеристиками, соответствующими характеристикам эхо-сигналов от реального объекта радиолокации.

Выражение для суммы эхо-сигналов в точке приема для такой модели приведено в выражении (1.2.1).

$$\begin{aligned} \dot{i}(t) = & \sum_p \sum_k \sum_i \sqrt{F_r(p,k,i,0)} \cdot I(p,k,i,t) + \\ & + j \sum_p \sum_k \sum_i \sqrt{F_r(p,k,i,0)} \cdot Q(p,k,i,t), \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

где  $p$ ,  $k$  и  $i$  – номера точек модели по декартовым осям  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  соответственно, а  $K_p$ ,  $K_k$  и  $K_i$  – количество элементов вдоль соответствующих осей координат.

Такой подход получил большое распространение при математическом моделировании распределенных объектов радиолокации [41,42,98,116]. Однако, с точки зрения полунатурного моделирования он имеет серьезные недостатки. При синтезе матричного имитатора на основе многоточечной модели, каждая ее точка должна быть представлена излучающей антенной, к которой подводятся сигналы с требуемыми характеристиками. Замещение реального распределенного объекта радиолокации с помощью таких МИ может потребовать сотен и даже тысяч [18,99,117–123] излучающих антенн в пределах одного элемента разрешения РЛС. Применение таких МИ считается неприемлемым ввиду трудностей в реализации таких антенных систем и в обеспечении огромной скорости обработки данных и затрат вычислительных ресурсов для таких моделей в реальном масштабе времени [62,63].

Поэтому при полунатурном моделировании применяются малоточечные модели, содержащие малое количество антенн в пределах одного элемента РЛС. Как правило, количество антенн меньше десяти [62,63]. Малоточечные модели синтезируются на основе многоточечных и обеспечивают на приемной стороне те же характеристики суммы эхо-сигналов, что и взятые за их основу многоточечные модели.

В настоящее время выделяют три вида малоточечных моделей, отличающихся, по сути, величиной статистической связи между сигналами, подводимыми к излучающим точкам [63,68–71,124]: когерентные, некогерентные и частично когерентные. Рассмотрим эти виды моделей подробнее.

### **1.3. Когерентные малоточечные геометрические модели РЛО**

К точкам когерентных моделей подводятся сигналы с коэффициентом взаимной корреляции, по модулю равным единице. Такая модель формирует в точке приема точечный КЦИ, положение которого определяется отношением

амплитуд и разностью фаз сигналов, подводимых к точкам модели [41,71,125–129].

Рассмотрим простейшую одномерную когерентную модель, содержащую две излучающие точки в пределах одного элемента разрешения РЛС. Пусть обобщенные координаты двух неподвижных точек равны  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ . К этим точкам подводятся сигналы с амплитудами  $A_1$  и  $A_2$  соответственно и разностью фаз  $\Delta\psi$  в точке приема. Для такой модели положение КЦИ  $\Delta\xi$ , согласно [41], определяется выражением (1.3.1).

$$\Delta\xi = \frac{1 - z^2}{1 + 2z \cos(\Delta\psi) + z^2}, \quad (1.3.1)$$

где  $z = n \frac{A_1}{A_2}$  - отношение амплитуд сигналов, подводимых к точкам модели, а  $n$  - знаковый множитель, соответствующий знаку при коэффициенте взаимной корреляции сигналов и принимающий значения 1 или  $-1$ .

Применение сложных сигналов позволяет одновременно формировать множество [71,103,130] КЦИ вдоль базы модели и осуществлять «поточечное» моделирование распределенного объекта радиолокации. Однако такой подход может потребовать больших вычислительных мощностей: необходимо рассчитать отсчеты сигналов, формирующих каждый из точечных КЦИ; чем больше количество этих точек, тем больше потребуется вычислений. Это накладывает ограничения на применение такого метода моделирования при работе в масштабах реального времени [62,63].

К преимуществам когерентных моделей можно отнести возможность управления точечным КЦИ в пределах  $\Delta\xi \in (-\infty; \infty)$  за счет одновременного регулирования амплитуд сигналов и разности фаз между ними.

К недостаткам когерентных моделей относятся:

- поточечное замещение распределенного объекта радиолокации может потребовать большого количества вычислений, зависящего от количества

формируемых точечных КЦИ. Соответственно, имеют место ограничения при работе МИ в масштабах реального времени;

- чувствительность регулируемого положения КЦИ к отношению амплитуд и разности фаз сигналов требует высокой точности обеспечения значений этих параметров в точке приема.

В ряде работ [74,130–133] исследовано влияние неточности установки разности фаз и отношения амплитуд сигналов на положение формируемого КЦИ. Неточности могут возникать из-за несбалансированности передающих каналов МИ, влияния диаграмм направленности излучателей, неточности обеспечения геометрических параметров МИ или РЛС при проведении полунатурного моделирования.

Рассмотрим влияние неточности установки разности фаз сигналов, излучаемых двухточечной когерентной моделью. Воспользуемся приведенным ранее выражением (1.3.1), выделив в нем величину фазовой ошибки:

$$\Delta\xi(\delta\psi) = \frac{1 - z^2}{1 + 2z \cos(\Delta\psi + \delta\psi) + z^2}, \quad (1.3.2)$$

где  $\delta\psi$  - отклонение значения разности фаз сигналов в точке приема от требуемого.

На рис. 1.3.1 приведена зависимость положения КЦИ от величины фазовой ошибки  $\delta\psi$  в точке приема для различных значений отношения амплитуд  $z$ . Требуемое значение разности фаз сигналов в точке  $\Delta\psi = \pi$ .

Как видно по рис. 1.3.1, для противофазных сигналов при  $z = 1.5$  и при допустимой ошибке позиционирования КЦИ в 10% от размера базы неточность установки разности фаз не должна превышать  $\frac{\pi}{30}$ . Согласно [74], соизмеримая неточность установки фазы может возникать при смещении фазового центра РЛС или центра базы МИ вдоль базы матричного имитатора на 7.5 мм при следующем наборе параметров: рабочая частота РЛС равна 10 ГГц, расстояние между фазовым центром РЛС и центром базы МИ равно 1.75 м, размер базы МИ равен 10 см.

Таким образом, неточность установки параметров сигналов когерентной модели, вызванная в том числе ошибками позиционирования излучающей системы МИ относительно фазового центра РЛС, оказывает существенное влияние на точность позиционирования КЦИ. При этом увеличение количества точек модели приводит как к увеличению объемов вычислений, так и к сложности обеспечения точности установки параметров сигналов для всех излучающих точек.

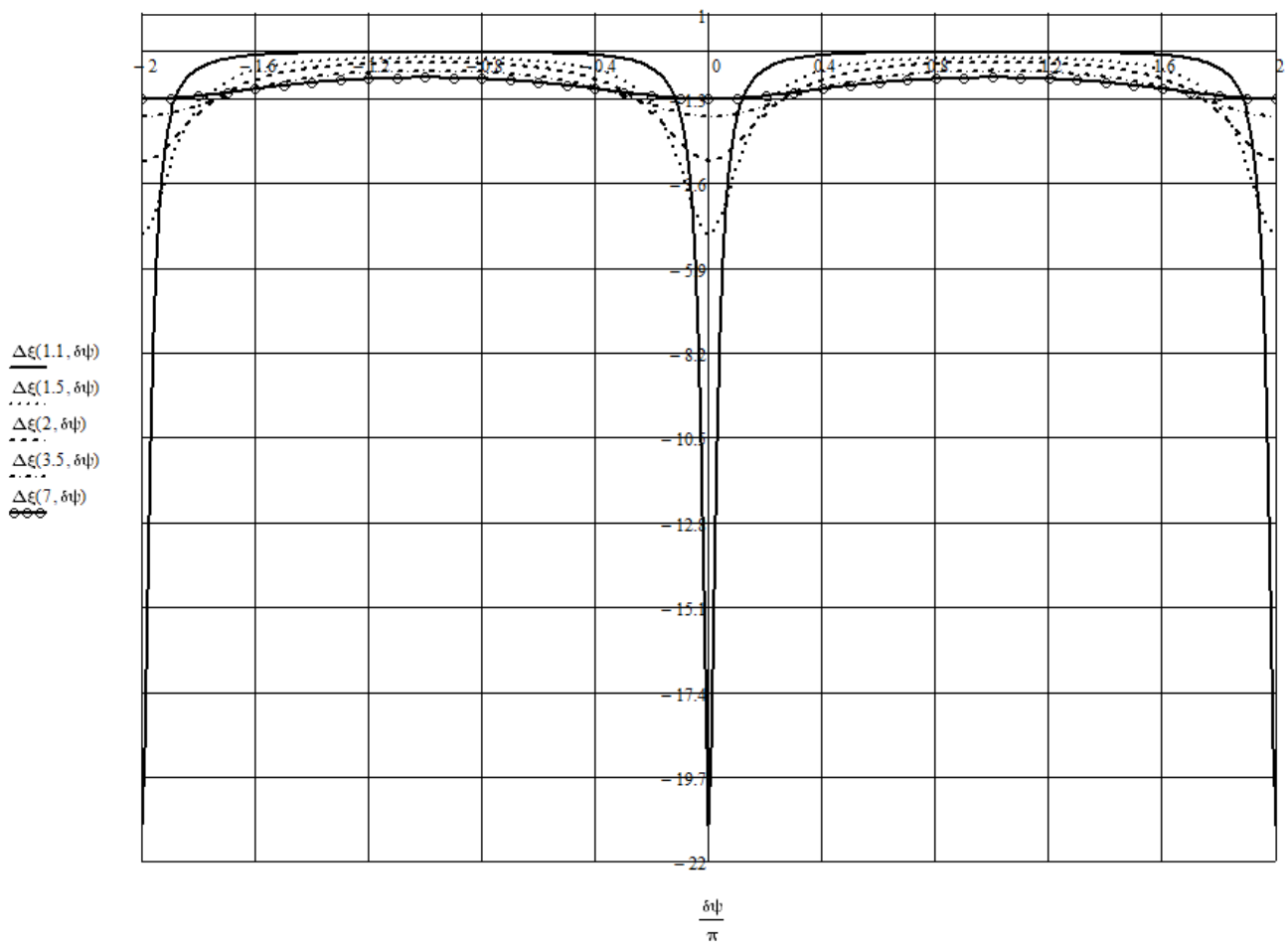


Рисунок 1.3.1 – Зависимость отклонения положения КЦИ от неточности установки фазы для противофазных сигналов

Малоточечные некогерентные геометрические модели и матричные имитаторы на их основе лишены недостатков, присущих когерентным моделям. Рассмотрим некогерентные модели подробнее.

#### 1.4. Некогерентные малоточечные геометрические модели РЛО

К точкам такой модели подводятся нормальные некоррелированные случайные процессы. Т.к. сигналы являются случайными процессами, то и положение КЦИ в разные моменты времени тоже является случайным. Управление флуктуациями КЦИ обеспечивается путем регулирования амплитуд (среднеквадратических отклонений или СКО) излучаемых случайных процессов. Таким образом, флуктуации КЦИ позволяют моделировать распределенный объект радиолокации с учетом угловых шумов [62–63, 78–79, 134–136].

Рассмотрим простейшую одномерную двухточечную некогерентную модель.

Пусть имеется две неподвижные точки с координатами  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ . К этим точкам подводятся нормальные некоррелированные случайные процессы сигналы с СКО  $U_1$  и  $U_2$ .

Математическое ожидание положения формируемого КЦИ и параметр ширины ПРВ угловых шумов для такой модели определяются выражениями (1.4.1).

$$\begin{cases} m_{\xi} = \frac{\gamma^2 - 1}{1 + \gamma^2}; \\ \mu_{\xi} = \frac{1 + \gamma^2}{2\gamma}, \end{cases} \quad (1.4.1)$$

где  $\gamma = \frac{U_2}{U_1}$  - отношение СКО сигналов, подводимых к точкам модели.

Некогерентная модель избавлена от недостатков когерентной. Т.к. в качестве сигналов используются некоррелированные случайные процессы, то к таким моделям не предъявляются требования к точности обеспечения разности фаз сигналов в точке приема. Флуктуации КЦИ позволяют моделировать РЛО с угловыми шумами даже в случае простейшей двухточечной модели.

Однако, как видно по выражениям (1.4.1), обеспечиваемые некогерентными моделями параметры ПРВ угловых шумов являются жестко связанными. Решение этой системы позволяет выразить эту связь математически:

$$\mu_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{1-m_{\xi}^2}}. \quad (1.4.2)$$

Из выражения (1.4.2) следует, что одному значению параметра ширины ПРВ УШ  $\mu_{\xi}$  соответствует только два значения математического ожидания  $m_{\xi}$ , равных по модулю и противоположных по знаку. Это означает невозможность независимого управления положением центра моделируемого РЛО и его размерами. Кроме того, диапазон возможных значений параметра ширины ПРВ ограничен:  $\mu_{\xi} \geq 1$ . График, соответствующий выражению (1.4.2) приведен на рис. 1.4.1.

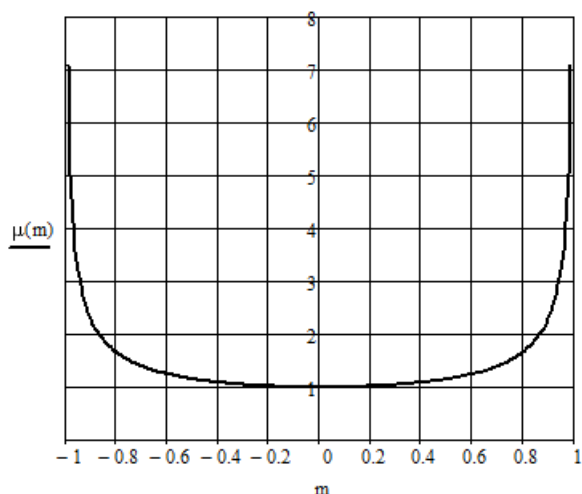


Рисунок 1.4.1 – связь значений параметров ПРВ УШ для двухточечной некогерентной модели

В работах [62,69,137] для устранения этого недостатка предложена трехточечная некогерентная модель, точки которой расположены на разном расстоянии друг от друга. Такая модель называется неэквидистантной трехточечной некогерентной. Параметры ПРВ угловых шумов, обеспечиваемых моделью, принимают значения из диапазона, описываемого выражениями (1.4.3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{\xi} \leq \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{-(m_{\xi} - \xi_2) \cdot (m_{\xi} - \xi_3)}}; \\ \frac{1}{\sqrt{-(m_{\xi} - \xi_3) \cdot (m_{\xi} - \xi_1)}}; \end{cases} \\ \mu_{\xi} \geq \frac{1}{\sqrt{-(m_{\xi} - \xi_2) \cdot (m_{\xi} - \xi_1)}}, \end{array} \right. \quad (1.4.3)$$

где  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$  - координаты точек модели.

Из выражения (1.4.3) следует, что сближение крайних точек модели приведет к расширению диапазона возможных значений параметра  $\mu_{\xi}$  в области его больших значений, а удаление точек, наоборот, к расширению диапазона для его малых значений. Кроме того, обеспечение значений  $\mu_{\xi} < 1$  возможно только путем вынесения внутренней точки модели за область, ограниченную крайними точками. Указанные особенности модели в условиях необходимости ее перестройки в масштабах реального времени могут привести к серьезным трудностям [62,63,137,138], вплоть до невозможности практического применения.

В работах [62,102,139–143] рассмотрены двумерные некогерентные модели, достоверно замещающие РЛО, распределенные по двум угловым координатам. Предложена пятиточечная некогерентная модель с одним подвижным излучателем и девятиточечная неэквилидистантная модель, все точки которой являются неподвижными. Пятиточечная некогерентная модель состоит из меньшего количества излучателей, однако, не всегда способна обеспечить независимое регулирование характеристик угловых шумов вдоль двух ортогональных осей координат [62,142]. Кроме того, механическая подвижность пятого излучателя такой модели накладывает дополнительные требования к точности его механического позиционирования со скоростью, удовлетворяющей масштабам реального времени. Из вышесказанного следует, для замещения РЛО, распределенных по двум угловым координатам, рекомендуется использовать девятиточечную неэквилидистантную модель [62,143].



Таким образом, можно выделить следующие недостатки некогерентных моделей:

- ограниченность диапазона обеспечиваемых параметров ПРВ угловых шумов приводит к необходимости увеличивать количество точек модели;

- применение моделей с меньшим количеством точек требует использования механически подвижных излучателей, что накладывает дополнительные ограничения на точность и скорость их позиционирования в масштабах реального времени.

Стоит отметить, что в настоящее время синтезировано большое количество малоточечных некогерентных моделей распределенных объектов радиолокации [62,78–79,123,144–145].

### **1.5. Частично когерентные малоточечные геометрические модели РЛО**

Другой вид малоточечных моделей – частично когерентные. К точкам частично когерентной модели подводятся коррелированные случайные процессы с коэффициентом взаимной корреляции, лежащем в диапазоне  $r \in (-1;0) \cup (0;1)$ . Модель формирует флуктуирующий КЦИ и обеспечивает замещение РЛО с учетом угловых шумов [41,63,82,146–147]. Управление флуктуациями КЦИ и параметрами угловых шумов осуществляется электронным образом путем изменения значений СКО подводимых к точкам случайных процессов и значений коэффициента их взаимной корреляции.

Нетрудно заметить, что при стремлении модуля коэффициента взаимной корреляции  $|r| \rightarrow 1$  частично когерентная модель переходит в полностью когерентную. При стремлении значения коэффициента взаимной корреляции  $r \rightarrow 0$  частично когерентная модель переходит в некогерентную.

Рассмотрим простейшую одномерную двухточечную частично когерентную модель.

Пусть имеется две неподвижные точки с координатами  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ . Сигналы, подводимые к этим точкам - нормальные коррелированные случайные процессы сигналы с СКО  $V_1$  и  $V_2$ , коэффициент взаимной корреляции равен  $r$ .

Математическое ожидание положения формируемого КЦИ и параметр ширины ПРВ угловых шумов для такой модели определяются выражениями (1.5.1).

$$\begin{cases} m_\xi = \frac{\gamma^2 - 1}{1 + 2r\gamma + \gamma^2}; \\ \mu_\xi = \frac{1 + 2r\gamma + \gamma^2}{2\gamma\sqrt{1 - r^2}}, \end{cases} \quad (1.5.1)$$

где  $\gamma = \frac{V_2}{V_1}$  - отношение СКО сигналов, подводимых к точкам модели.

Параметры ПРВ УШ, обеспечиваемые частично когерентной моделью, могут принимать значения  $-\infty < m_\xi < \infty$  и  $0 \leq \mu_\xi < \infty$  независимо друг от друга [41].

Для задачи синтеза модели система (1.5.1) может быть преобразована относительно параметров сигналов  $\gamma$  и  $r$  [82]:

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{1 + \frac{4m_\xi}{(1 - m_\xi)^2 + \frac{1}{\mu_\xi^2}}}; \\ r = \frac{\gamma^2 \cdot (1 - m_\xi) - (1 + m_\xi)}{2m_\xi \cdot \gamma}. \end{cases} \quad (1.5.2)$$

Известны [63,148] двумерные четырехточечные частично когерентные модели, достоверно замещающие РЛО, имеющие распределение по двум угловым координатам. Такие модели обеспечивают независимое регулирование параметров ПРВ и спектрально-корреляционных характеристик УШ вдоль двух ортогональных осей координат.

Таким образом, частично когерентные модели обладают определенными преимуществами:

1) по сравнению с некогерентными:

- регулируемое значение коэффициента взаимной корреляции между сигналами, подводимыми к точкам модели, обеспечивает возможность независимого обеспечения параметров ПРВ УШ во всем диапазоне их возможных значений:  $-\infty < m_{\xi} < \infty$  и  $0 \leq \mu_{\xi} < \infty$ ;

- частично когерентная модель способна обеспечивать достоверное замещение распределенного РЛО с учетом угловых шумов при меньшем количестве точек, чем некогерентная модель: две по сравнению с тремя для одномерных моделей; четыре по сравнению с пятью или девятью для двумерных моделей;

- точки модели являются неподвижными, а перестройка модели осуществляется путем электронного изменения СКО, коэффициента взаимной корреляции и корреляционных функций сигналов, подводимых к точкам модели.

2) По сравнению с когерентными:

- использование в качестве сигналов нормальных случайных процессов с коэффициентом взаимной корреляции  $|r| < 1$  позволяет формировать один флуктуирующий КЦИ и, таким образом, замещать распределенный объект радиолокации без необходимости введения дополнительных точек модели с целью формирования дополнительных КЦИ;

- пониженные требования к фазировке излучаемых сигналов в точке приема, что упрощает проведение полунатурного моделирования.

Из вышесказанного следует, что частично когерентные модели предоставляют большие возможности по математическому и полунатурному моделированию распределенных РЛО. Однако в настоящее время база частично когерентных малоточечных моделей распределенных радиолокационных объектов не накоплена. Известны лишь примеры их ограниченного применения для замещения фрагмента земной поверхности [63,149].

Как указывалось в п. 1.4, существует большое количество синтезированных малоточечных некогерентных моделей, достоверно замещающих распределенные РЛО с учетом угловых шумов. Кроме того, в работе [150] была показана эквивалентность одномерной двухточечной частично когерентной модели и неэквидистантной трехточечной некогерентной с точки зрения обеспечиваемых ими параметров угловых шумов. Такая эквивалентность может быть использована для синтеза частично когерентных моделей объектов радиолокации на основе их известных некогерентных моделей.

Рассмотрим эквивалентность моделей подробнее.

### 1.6. Эквивалентность одномерной двухточечной частично когерентной модели и неэквидистантной трехточечной некогерентной

Рассмотрим частично когерентную двухточечную модель. Пусть источники излучения располагаются в точках  $-1$  и  $1$  на оси обобщенных координат  $\xi$ . Обозначим как  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  сигналы, подводимые к первому и второму излучателям модели. Сигналы являются коррелированными нормальными случайными процессами с нулевым математическим ожиданием. Коэффициент взаимной корреляции сигналов равен  $r$ . СКО сигнала первого излучателя  $-\sigma_1$ , второго  $-\sigma_2$ . Конфигурация точек модели представлена на рис. 1.6.1. Выражения для параметров ПРВ УШ, обеспечиваемых такой моделью, приведены в выражении (1.5.1)

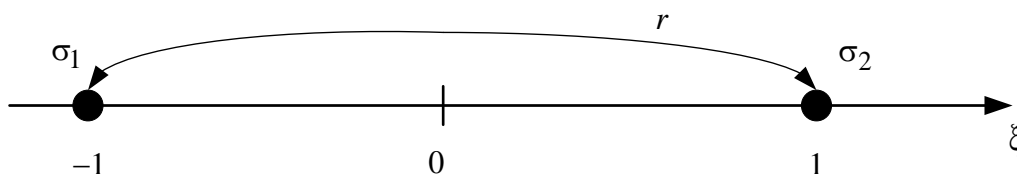


Рисунок 1.6.1 – Двухточечная частично когерентная модель.

Известно, что коррелированные сигналы можно представить в виде суммы двух компонент [151,152]. Одна из компонент является общей для двух сигналов. Вторая – является случайной добавкой. При формировании двух сигналов с

заданной величиной коэффициента взаимной корреляции происходит сложение общей и случайной компоненты со своими весами (СКО).

Пусть  $A_1$  и  $A_2$  – СКО зависимых составляющих  $u_0(t)$  первого и второго сигнала соответственно. СКО независимых составляющих первого  $u_1(t)$  и второго  $u_2(t)$  сигнала обозначим как  $U_1$  и  $U_2$  соответственно. Сигналы  $u_0(t)$ ,  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  являются попарно некоррелированными нормальными случайными процессами. С учетом введенных обозначений можно записать выражения, определяющие сигналы, излучаемые двухточечной частично когерентной моделью:

$$\begin{cases} \sigma_1 s_1(t) = n_1 A_1 u_0(t) + U_1 u_1(t); \\ \sigma_2 s_2(t) = n_2 A_2 u_0(t) + U_2 u_2(t), \end{cases} \quad (1.6.2)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  являются знаковыми множителями и принимают значения 1 или  $-1$  в зависимости от знака при коэффициенте корреляции  $r$ .

В силу статистической независимости сигналов  $u_0(t)$ ,  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  дисперсии сигналов, излучаемых двухточечной частично когерентной моделью, определяются как

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = A_1^2 + U_1^2; \\ \sigma_2^2 = A_2^2 + U_2^2. \end{cases} \quad (1.6.3)$$

Статистическая связь сигналов  $\sigma_1 s_1(t)$  и  $\sigma_2 s_2(t)$  определяется коэффициентом их взаимной корреляции:

$$r = \frac{R(\tau)}{\sigma_1 \sigma_2} \Big|_{\tau=0} = \frac{R(0)}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (1.6.4)$$

где  $R(\tau)$  – взаимная корреляционная функция (ВКФ) сигналов  $\sigma_1 s_1(t)$  и  $\sigma_2 s_2(t)$ .

Определим  $R(\tau)$  с учетом (1.6.2):

$$\begin{aligned}
R(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_1 s_1(t) \sigma_1 s_2(t - \tau) dt = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} (n_1 A_1 u_0(t) + U_1 u_1(t)) (n_2 A_2 u_0(t - \tau) + U_2 u_2(t - \tau)) dt = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} n_1 n_2 A_1 A_2 u_0(t) u_0(t - \tau) dt + \int_{-\infty}^{\infty} n_1 A_1 U_2 u_0(t) u_2(t - \tau) dt + \\
&\quad + \int_{-\infty}^{\infty} U_1 n_2 A_2 u_1(t) u_0(t - \tau) dt + \int_{-\infty}^{\infty} U_1 U_2 u_1(t) u_2(t - \tau) dt.
\end{aligned}$$

Так как случайные процессы с разными индексами не коррелированы, то выражение для ВКФ сильно упрощается из-за равенства нулю всех интегралов, кроме первого:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} n_1 A_1 n_2 A_2 u_0(t) u_0(t - \tau) dt = n_1 n_2 A_1 A_2 \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t) u_0(t - \tau) dt. \quad (1.6.5)$$

Поскольку  $u_0(t)$  – нормальный случайный процесс, результат интегрирования в выражении (1.6.5) при  $\tau = 0$  равен 1 [152,153].

Тогда выражение (1.6.4) для коэффициента взаимной корреляции сигналов, излучаемых двухточечной моделью, примет вид

$$r = \frac{R(0)}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{n_1 A_1 n_2 A_2}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{A_2^2 z}{\sigma_1^2 \gamma}, \quad (1.6.6)$$

где  $z = \frac{n_1 A_1}{n_2 A_2}$ .

Анализируя выражение (1.6.2), 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  $z = \frac{n_1 A_1}{n_2 A_2}$  и может быть рассчитана по

выражению  $\Delta\xi = \frac{1-z}{1+z}$ . 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 –  $U_2u_2(t)$ .

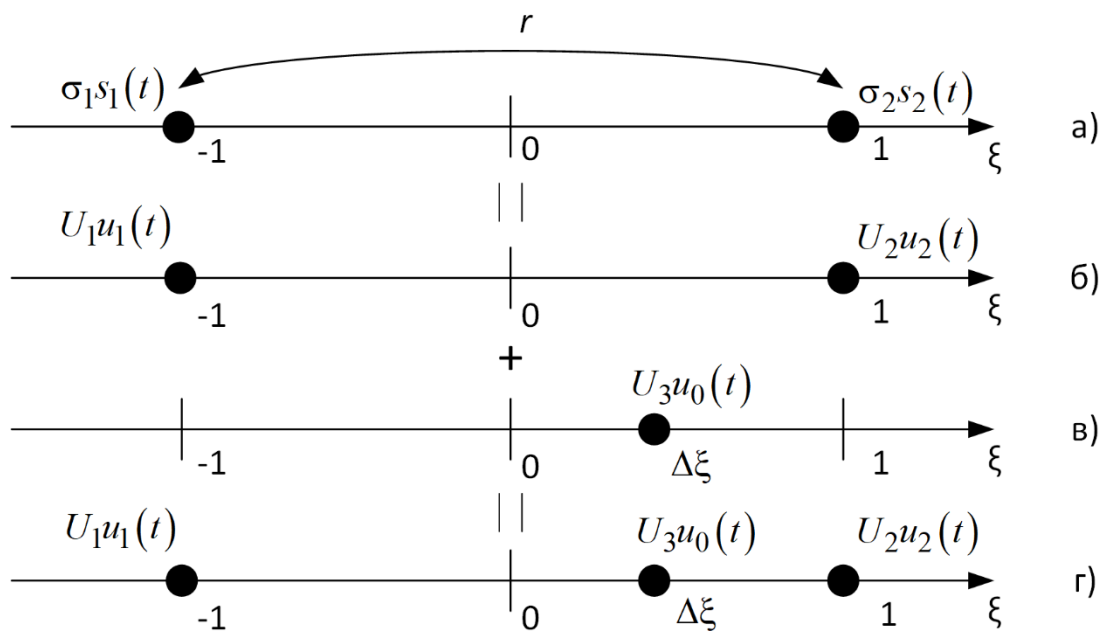


Рисунок 1.6.2 – Переход от двухточечной частично когерентной модели к трехточечной некогерентной

Рассматривая суперпозицию когерентной и некогерентной моделей, получаем трехточечную некогерентную неэквидистантную геометрическую модель. Третий источник при этом является виртуальным. Схематично структура перехода показана на рис. 1.6.2.

Рассмотрим полученную трехточечную некогерентную модель.

Первый излучатель модели имеет координату  $\xi_1 = -1$  и излучает сигнал  $u_1(t)$  с СКО  $U_1$ . Второй излучатель располагается в точке  $\xi_2 = 1$  и излучает

сигнал  $u_2(t)$  с СКО  $U_2$ . Третий излучатель располагается между первыми двумя в точке  $\xi_3 = \Delta\xi$  и излучает сигнал  $u_3(t)$  с СКО  $U_3$ .

Параметры ПРВ положения КЦИ для такой модели зависят как от положения точек, так и от СКО излучаемых ими сигналов [41,62,137]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\xi_{HK}} = \frac{\xi_1\gamma_1^2 + \xi_2\gamma_2^2 + \xi_3}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1}; \\ \mu_{\xi_{HK}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\xi_1^2\gamma_1^2 + \xi_2^2\gamma_2^2 + \xi_3^2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1} - \left(\frac{\xi_1\gamma_1^2 + \xi_2\gamma_2^2 + \xi_3}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1}\right)^2}}; \end{array} \right. \quad (1.6.7)$$

где  $\gamma_1 = \frac{U_1}{U_3}$  и  $\gamma_2 = \frac{U_2}{U_3}$  – нормированные к СКО сигнала третьего излучателя СКО первого и второго сигналов соответственно.

Подставим в выражения (1.6.7) координаты излучающих точек некогерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\xi_{HK}} = \frac{\gamma_2^2 - \gamma_1^2 + \Delta\xi}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1}; \\ \mu_{\xi_{HK}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \Delta\xi^2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1} - \left(\frac{\gamma_2^2 - \gamma_1^2 + \Delta\xi}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1}\right)^2}}. \end{array} \right. \quad (1.6.8)$$

Приведем нормированные СКО  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  к нормированным дисперсиям с учетом выражений (1.6.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1^2 = \frac{U_1^2}{U_3^2} = \frac{\sigma_1^2 - A_1^2}{(A_1 + A_2)^2} = \frac{\sigma_1^2 - z^2 A_2^2}{A_2^2 \cdot (1+z)^2}; \\ \gamma_2^2 = \frac{U_2^2}{U_3^2} = \frac{\sigma_2^2 - A_2^2}{A_2^2 \cdot (1+z)^2}. \end{array} \right. \quad (1.6.9)$$

Подставим (1.6.9) в (1.6.7) и после математических преобразований получим



$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\xi_{HK}} = \frac{\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} - 1}{1 + 2z \frac{A_2^2}{\sigma_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}} = \frac{\gamma^2 - 1}{1 + 2z \frac{A_2^2}{\sigma_1^2} + \gamma^2} = \frac{\gamma^2 - 1}{1 + 2 \cdot r \cdot \gamma + \gamma^2}; \\ \mu_{\xi_{HK}} = \frac{1 + 2\gamma r + \gamma^2}{\sqrt{4\gamma^2 - (2\gamma r)^2}} = \frac{1 + 2\gamma r + \gamma^2}{2\gamma\sqrt{1 - r^2}}. \end{array} \right. \quad (1.6.10)$$

Выражения (1.6.10) и (1.5.1), определяющие обеспечиваемые трехточечной некогерентной неэквидистантной и двухточечной частично когерентной моделями параметры ПРВ угловых шумов  $m$  и  $\mu$ , тождественно равны. Это подтверждает физическую реализуемость декомпозиции и перехода между моделями.

Таким образом, доказанная эквивалентность означает возможность синтеза частично когерентных моделей на основе некогерентных.

Однако, в настоящее время не рассмотрены границы этой эквивалентности. Не доказана эквивалентность двумерных моделей: четырехточечной частично когерентной и пяти- или девятиточечной некогерентной. Разработка аппарата синтеза частично когерентных моделей на основе некогерентных и его последующее применение позволит осуществить серьезное развитие области полунатурного моделирования распределенных объектов радиолокации и усовершенствовать технологию применяемых для этого матричных имитаторов.

## 1.7. Основные задачи исследования

Исходя из вышесказанного сформулированы следующие **основные задачи** исследования.

- 1) Определить границы эквивалентности одномерной двухточечной частично когерентной и неэквидистантной трехточечной некогерентной моделей.
- 2) Доказать эквивалентность четырехточечной частично когерентной и пяти- или девятиточечной некогерентной моделей, достоверно замещающих РЛО, имеющий распределение по двум угловым координатам.

3) Разработать математический аппарат синтеза частично когерентных моделей на основе эквивалентных им некогерентных моделей, формирующих ПРВ и спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов замещаемого РЛО, имеющего распределение по двум угловым координатам.

4) Развить полученные теоретические результаты до уровня практического применения на примере синтеза четырехточечной частично когерентной модели объемно-распределенного метеообразования.

### **1.8. Заключение по первому разделу**

Отмечена важность этапа полунатурного моделирования при разработке и испытаниях современных РЛС.

Отмечено, что наиболее полным и достоверным подходом к моделированию протяженных объектов радиолокации является применение матричных имитаторов. Рассмотрены угловые шумы протяженных радиолокационных целей как физическое явление, которое необходимо учитывать при радиолокационном наблюдении реальных объектов радиолокации. Показано, что для достоверного замещения РЛО с учетом угловых шумов необходимо обеспечить на апертуре приемного устройства флуктуации фазового фронта суммарной отраженной волны с требуемыми характеристиками: плотностью распределения вероятностей направления нормали к его поверхности и корреляционной функцией его флуктуаций.

Рассмотрены различные виды математических моделей распределенных объектов радиолокации, применяемых для синтеза матричных имитаторов на их основе. Приведены преимущества и недостатки каждого из видов моделей. Показано, что наиболее перспективным видом являются частично когерентные модели, излучающие коррелированные сигналы со значением коэффициента взаимной корреляции, лежащим в диапазоне  $r \in (-1;0) \cup (0;1)$ . Отмечено, что в настоящее время не накоплена база синтезированных частично когерентных моделей, достоверно замещающих распределенные объекты радиолокации.

Отмечено, что в настоящее время существует большое количество синтезированных достоверных некогерентных моделей распределенных объектов радиолокации. Показана эквивалентность двухточечной частично когерентной и неэквидистантной трехточечной когерентной моделей. Эта эквивалентность означает возможность синтеза частично когерентных моделей на основе известных некогерентных.

Сформулированы основные задачи исследования.

## **2. Синтез частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов**

В разделе 1 приведены преимущества частично когерентных моделей по сравнению с некогерентными, а также показана эквивалентность одномерных моделей с точки зрения обеспечения ими параметров ПРВ. Отмечено, что не существует математического аппарата для перехода от одного семейства моделей к другим. Кроме того, не доказана эквивалентность двумерных частично когерентных и некогерентных моделей.

Синтез частично когерентных моделей на основе некогерентных можно разделить на две составляющие:

- синтез моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов;
- синтез моделей, обеспечивающих заданные корреляционные функции квадратур сигналов, подводимых к излучателям модели.

Цель раздела 2: обосновать метод синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей замещаемого радиолокационного объекта.

Для достижения поставленных целей решены следующие задачи:

- получены выражения, определяющие границы эквивалентности некогерентных и частично когерентных моделей;
- получены выражения, позволяющие осуществить переход между одномерной трехточечной некогерентной и одномерной двухточечной частично когерентной моделями, обеспечивающими заданные параметры ПРВ УШ;
- показана эквивалентность двумерной четырехточечной частично когерентной модели двумерным пяти- и девятиточечным некогерентным;
- получены выражения, позволяющие осуществить переход между двумерной пяти- или девятиточечной некогерентной и двумерной четырехточечной частично когерентной моделями, обеспечивающими заданные параметры ПРВ УШ.

## 2.1. Границы эквивалентности моделей

Цель подраздела 2.1: определить диапазоны эквивалентности одномерных некогерентных и частично когерентных моделей.

Пусть излучающие точки частично когерентной двухточечной модели имеют, как и ранее, нормированные координаты  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ . Исходя из требуемых значений  $m_\xi$  и  $\mu_\xi$ , используя соотношения (1.6.3) и (1.6.6), определим параметры сигналов, излучаемых частично когерентной двухточечной моделью – коэффициент взаимной корреляции  $r_\xi$ , СКО сигналов  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  – на основе параметров декомпозиции, рассмотренной в п. 1.6.

Синтез эквивалентной некогерентной геометрической модели можно осуществить, решив систему уравнений

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = A_1^2 + U_1^2; \\ \sigma_2^2 = A_2^2 + U_2^2; \\ r_\xi = \frac{n_1 A_1 n_2 A_2}{\sigma_1 \sigma_2}; \\ \Delta\xi = \frac{1-z}{1+z}, \end{cases} \quad (2.1.1)$$

где  $z = \frac{n_1 A_1}{n_2 A_2}$ , а  $n_1 = \pm 1$  и  $n_2 = \pm 1$  в зависимости от знака при коэффициенте корреляции.

В системе (2.1.1) четыре уравнения и пять неизвестных величин, определяющих параметры некогерентной трехточечной неэквидистантной модели:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  и  $\Delta\xi$ . Следовательно, существует более одного решения данной системы уравнений. Каждое решение системы определяет свою некогерентную трехточечную неэквидистантную геометрическую модель. Эти модели в первую очередь различаются между собой значением  $\Delta\xi$ .

С учетом неопределенного значения  $\Delta\xi$  можно записать решение системы (2.1.1) как

$$\begin{cases} A_1^2 = \frac{1 - \Delta\xi}{1 + \Delta\xi} \cdot r \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2; \\ A_2^2 = \frac{1 + \Delta\xi}{1 - \Delta\xi} \cdot r \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2; \\ U_1^2 = \sigma_1^2 - \frac{1 - \Delta\xi}{1 + \Delta\xi} \cdot r \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2; \\ U_2^2 = \sigma_2^2 - \frac{1 + \Delta\xi}{1 - \Delta\xi} \cdot r \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2. \end{cases} \quad (2.1.2)$$

В [62,79,137] исследованы свойства некогерентных геометрических моделей, а также их возможности по замещению отражений от распределенных объектов. Там же приводятся соотношения, определяющие границы диапазона, в пределах которого могут лежать параметры ПРВ угловых шумов, формируемых моделью. Применительно к используемым обозначениям эти соотношения могут быть записаны в виде

$$\begin{cases} \mu_\xi \leq \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{-(m_\xi - \xi_2)(m_\xi - \Delta\xi)}}; \\ \frac{1}{\sqrt{-(m_\xi - \Delta\xi)(m_\xi - \xi_1)}}; \end{cases} \\ \mu_\xi \geq \frac{1}{\sqrt{-(m_\xi - \xi_2)(m_\xi - \xi_1)}}. \end{cases} \quad (2.1.3)$$

Границы этого диапазона полностью определяются положением излучающих точек. Установка требуемых параметров ПРВ угловых шумов, лежащих в пределах границ диапазона, обеспечивается заданием мощностей излучаемых сигналов.

Из (2.1.3) видно, что максимальный диапазон регулировки параметра  $\mu_\xi$  ПРВ угловых шумов, формируемых трехточечной неэквидистантной моделью, наблюдается при  $m_\xi = \Delta\xi$ . Тогда в соотношениях (2.1.1) и (2.1.2) закономерно принять  $\Delta\xi = m_\xi$ .

При  $\Delta\xi \neq m_\xi$  значение  $\Delta\xi$  должно лежать в пределах разрешенного диапазона, удовлетворяющего условиям (2.1.3) и требованиям к вещественным неотрицательным значениям дисперсий сигналов в (2.1.1). Границы этого диапазона на основе выражений (1.5.1) и (1.6.3), (1.6.6) определены в [154] путем нескольких математических преобразований:

$$\begin{cases} \Delta\xi_{\min}(m_\xi, \mu_\xi) = \frac{\mu_\xi^2 \cdot m_\xi \cdot (1 - m_\xi) - 1}{\mu_\xi^2 (1 - m_\xi)}; \\ \Delta\xi_{\max}(m_\xi, \mu_\xi) = \frac{1 + \mu_\xi^2 \cdot m_\xi \cdot (1 + m_\xi)}{\mu_\xi^2 (1 + m_\xi)}. \end{cases} \quad (2.1.4)$$

Условиям физической реализуемости некогерентной модели удовлетворяет значение  $\Delta\xi_{\min} \leq \Delta\xi \leq \Delta\xi_{\max}$ .

Т.к. параметры  $\Delta\xi$  и  $z_\xi = \frac{n_1 A_1}{n_2 A_2}$  в системе (2.1.1) связаны, то можно записать

выражения (2.1.4) относительно параметра  $z_\xi$ :

$$\begin{cases} z_{\xi_{\min}}(m_\xi, \mu_\xi) = \frac{\mu_\xi^2 \cdot (1 - m_\xi^2) - 1}{1 + \mu_\xi^2 \cdot (1 + m_\xi^2)}; \\ z_{\xi_{\max}}(m_\xi, \mu_\xi) = \frac{1 + \mu_\xi^2 \cdot (1 - m_\xi^2)}{\mu_\xi^2 \cdot (1 - m_\xi^2) - 1}. \end{cases} \quad (2.1.5)$$

Условиям физической реализуемости некогерентной модели удовлетворяет значение  $z_{\xi_{\min}} \leq z_\xi \leq z_{\xi_{\max}}$ .

Таким образом, выражениям (2.1.1) и (2.1.2) позволяют определить параметры  $r_\xi$ ,  $\Delta\xi$ ,  $z_\xi$ ,  $A_1$  и  $A_2$ , необходимые для перехода от трехточечной некогерентной неэквидистантной модели к двухточечной некогерентной, обеспечивающей требуемые значения параметров ПРВ угловых шумов. Выражения (2.1.3) - (2.1.5) определяют границы физической реализуемости перехода между моделями.

При невыполнении условий (2.1.3) – (2.1.5) некогерентная модель является физически нереализуемой: невозможен синтез некогерентной модели, обеспечивающей заданные параметры ПРВ. При этом синтезированная на ее основе частично когерентная модель, как будет показано в п. 2.3, является физически реализуемой. Это подтверждает большие возможности частично когерентных моделей по управлению угловыми шумами, однако, задействованное ранее понятие эквивалентности моделей в данном случае не применимо.

Более подробно пример синтеза физически реализуемой частично когерентной модели на основе физически нереализуемой некогерентной рассмотрен в п. 2.3.

## **2.2. Эквивалентность двумерных частично когерентных и некогерентных моделей**

В разделе 1 доказана эквивалентность одномерной двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной с точки зрения обеспечиваемых ими параметров ПРВ угловых шумов. В предыдущем пункте 2.1 был рассмотрен переход между моделями и определены границы эквивалентности. Однако реальные отражающие объекты имеют распределение по двум угловым координатам, т.е. являются двумерными. Очевидно, что одномерные матричные имитаторы не обеспечивают достоверного моделирования эхосигналов от двумерных распределенных объектов. В настоящее время не доказана эквивалентность двумерных частично когерентных и некогерентных моделей и не разработан математический аппарат для перехода между ними. Рассмотрим модели, обеспечивающие регулирование параметров ПРВ УШ по двум осям координат.

Известны двумерные четырехточечные частично когерентные модели радиолокационных объектов, состоящие из четырех неподвижных излучателей, и двумерные некогерентные модели, состоящие из девяти неподвижных излучателей или из пяти излучателей, один из которых является подвижным. Эти модели позволяют формировать угловые шумы распределенных двумерных



объектов и обеспечивают независимое регулирование параметров двумерной ПРВ УШ по двум взаимно ортогональным осям координат [63,148]. Цели подраздела 2.2: доказать эквивалентность двумерной четырехточечной частично когерентной и пяти- и девятиточечных некогерентных моделей, а также получить выражения, позволяющие синтезировать двумерную частично когерентную модель на основе двумерной некогерентной.

Рассмотрим двумерную четырехточечную частично когерентную модель.

Пусть имеется четыре излучателя нормальных коррелированных случайных процессов  $\sigma_i s_i(t)$  с СКО  $\sigma_i$ , где  $i$  – номер излучателя модели. Координаты излучателей определяются их расположением относительно двух угловых осей координат:  $OX$  и  $OY$ . Для упрощения положим, что все точки располагаются в вершинах прямоугольника или в частном случае квадрата с нормированной длиной стороны равной 2 так, как показано белыми маркерами-кругами на рис. 2.2.1.

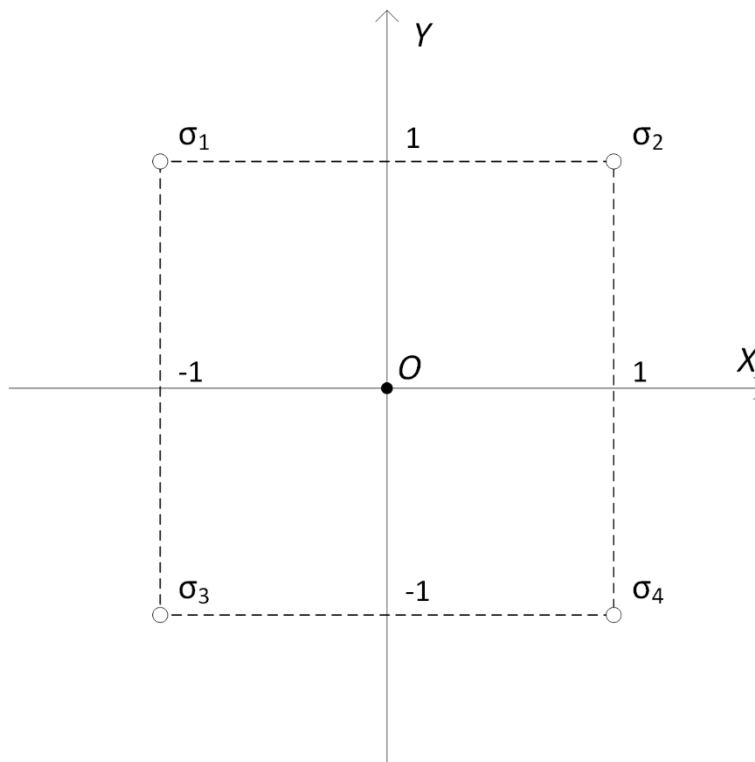


Рисунок 2.2.1 – Двумерная четырехточечная частично когерентная модель

Матрица коэффициентов корреляции (2.2.1) описывает взаимную корреляцию сигналов  $s_i(t)$ .

$$r = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{12} & 1 & r_{23} & r_{24} \\ r_{13} & r_{23} & 1 & r_{34} \\ r_{14} & r_{24} & r_{34} & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2.1)$$

Коэффициенты корреляции, расположенные на главной диагонали матрицы (2.2.1), являются коэффициентами автокорреляции, следовательно, равны 1:  $r_{11} = r_{22} = r_{33} = r_{44} = 1$ . Очевидным является равенство коэффициентов, расположенных симметрично относительно главной диагонали матрицы.

Рассмотрим проекции точек модели на ось  $OX$ . С учетом ранее принятого расположения точек четырехточечной модели в вершинах квадрата, ее проекция на ось  $OX$  будет представлять собой две точки с координатами  $x_1$  и  $x_2$ . Каждой проекции будет соответствовать излучение суммарного сигнала всех проецируемых источников:

$$\begin{cases} \sigma_{x_1} s_{x_1}(t) = \sigma_1 s_1(t) + \sigma_3 s_3(t); \\ \sigma_{x_2} s_{x_2}(t) = \sigma_2 s_2(t) + \sigma_4 s_4(t), \end{cases} \quad (2.2.2)$$

где  $\sigma_{x_1} s_{x_1}(t)$  и  $\sigma_{x_2} s_{x_2}(t)$  – сигналы, излучаемые виртуальными источниками проекции модели на ось  $OX$ , а  $\sigma_{x_1}$  и  $\sigma_{x_2}$  – СКО сигналов этих излучателей соответственно, определяемые выражениями:

$$\begin{cases} \sigma_{x_1}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1 \cdot \sigma_3 \cdot r_{13}; \\ \sigma_{x_2}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\sigma_2 \cdot \sigma_4 \cdot r_{24}. \end{cases} \quad (2.2.3)$$

Аналогичным образом исходная модель проецируется на ось  $OY$ :

$$\begin{cases} \sigma_{y_1} s_{y_1}(t) = \sigma_3 s_3(t) + \sigma_4 s_4(t); \\ \sigma_{y_2} s_{y_2}(t) = \sigma_1 s_1(t) + \sigma_2 s_2(t), \end{cases} \quad (2.2.4)$$

где  $\sigma_{y_1} s_{y_1}(t)$  и  $\sigma_{y_2} s_{y_2}(t)$  – сигналы, излучаемые виртуальными источниками проекции модели на ось  $OY$ , а  $\sigma_{y_1}$  и  $\sigma_{y_2}$  – СКО сигналов этих излучателей соответственно, определяемые выражениями:

$$\begin{cases} \sigma_{y_1}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + 2\sigma_3 \cdot \sigma_4 \cdot r_{34}; \\ \sigma_{y_2}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot r_{12}. \end{cases} \quad (2.2.5)$$

Таким образом, исходная четырехточечная частично когерентная модель разлагается проецированием на две двухточечные частично когерентные модели, расположенные на осях координат  $OX$  и  $OY$ . Выражения для параметров ПРВ таких моделей известны из литературы [41]:

$$\begin{cases} m_x(\gamma_x, r_x) = \frac{\gamma_x^2 - 1}{1 + 2r_x\gamma_x + \gamma_x^2}; \\ \mu_x(\gamma_x, r_x) = \frac{1 + 2r_x\gamma_x + \gamma_x^2}{2\gamma_x\sqrt{1 - r_x^2}}. \end{cases} \quad \begin{cases} m_y(\gamma_y, r_y) = \frac{\gamma_y^2 - 1}{1 + 2r_y\gamma_y + \gamma_y^2}; \\ \mu_y(\gamma_y, r_y) = \frac{1 + 2r_y\gamma_y + \gamma_y^2}{2\gamma_y\sqrt{1 - r_y^2}}. \end{cases} \quad (2.2.6)$$

где  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$  - отношение СКО излучаемых сигналов соответственной модели-проекции, а  $r_x$  и  $r_y$  – коэффициенты их взаимной корреляции.

Совмещенная конфигурация точек исходной частично когерентной модели (белые круги) и ее моделей-проекций (черные круги) приведена на рис. 2.2.2.

В разделе 1 и в пункте 2.1 был рассмотрен переход от одномерной двухточечной частично когерентной модели к одномерной трехточечной некогерентной. Воспользуемся им для преобразования моделей-проекций двумерной четырехточечной частично когерентной модели. При этом достаточно рассмотреть переход только для одной из них, например, для модели-проекции на ось координат  $oX$ . Для второй оси преобразования будут аналогичными.

Рассмотрим подробнее проекцию модели на ось  $oX$ .

Для сигналов ее точек справедливы выражения, аналогичные (1.6.2):

$$\begin{cases} \sigma_{x_1} s_{x_1}(t) = n_{x_1} A_{x_1} u_{x_0}(t) + U_{x_1} u_{x_1}(t); \\ \sigma_{x_2} s_{x_2}(t) = n_{x_2} A_{x_2} u_{x_0}(t) + U_{x_2} u_{x_2}(t), \end{cases} \quad (2.2.7)$$

где  $u_{x_0}(t)$  – когерентные составляющие сигналов частично когерентной модели-проекции, а  $A_{x_1}, A_{x_2}$  – их СКО,  $n_{x_1}, n_{x_2}$  – их знаки,  $u_{x_1}(t)$  и  $u_{x_2}(t)$  – некогерентные составляющие исходных сигналов, а  $U_{x_1}$  и  $U_{x_2}$  – их СКО.

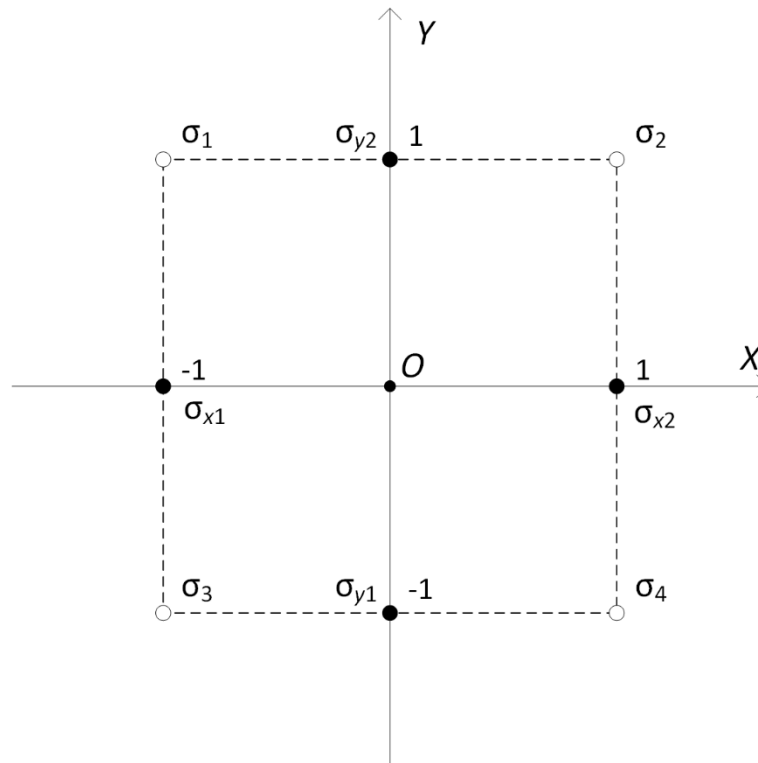


Рисунок 2.2.2 – Схема перехода от двухмерной частично когерентной модели к моделям-проециям

При этом все три сигнала составляющих:  $u_{x_0}(t)$ ,  $u_{x_1}(t)$  и  $u_{x_2}(t)$  – попарно некоррелированные нормальные случайные процессы. Их дисперсии связаны с дисперсиями сигналов модели проекции следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_{x_1}^2 = A_{x_1}^2 + U_{x_1}^2; \\ \sigma_{x_2}^2 = A_{x_2}^2 + U_{x_2}^2. \end{cases} \quad (2.2.8)$$

Тогда, согласно (1.6.6):

$$r_x = \frac{A_{x_2}^2}{\sigma_{x_1}^2} \cdot \frac{z_x}{\gamma_x}, \quad (2.2.9)$$

где  $z_x = \frac{n_{x_1} A_{x_1}}{n_{x_2} A_{x_2}}$ .

Как и в разделе 1, представляем двухточечную частично когерентную модель в виде суммы двухточечной некогерентной и двухточечной когерентной.

К двухточечной некогерентной модели относятся составляющие  $U_{x_1} u_{x_1}(t)$  и  $U_{x_2} u_{x_2}(t)$ . Расположение точек такой модели совпадает с расположением точек исходной двухточечной частично когерентной модели.

К двухточечной когерентной модели относятся составляющие  $n_{x_1} A_{x_1} u_{x_0}(t)$  и  $n_{x_2} A_{x_2} u_{x_0}(t)$ . Такая модель приводится [153] к одному виртуальному излучателю суммарного сигнала с СКО  $U_{x_3} = n_{x_1} A_{x_1} + n_{x_2} A_{x_2}$ , расположенному в точке

$$\Delta x = \frac{1 - z_x}{1 + z_x}.$$

Как показано в разделе 1 в соотношениях (1.6.7) – (1.6.10), выражения для параметров ПРВ УШ такой двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной модели тождественно равны, что означает возможность и адекватность перехода между моделями.

Таким образом, для проекции двумерной четырехточечной частично когерентной модели на ось  $OX$ , которая является двухточечной частично когерентной моделью, можно подобрать эквивалентную ей трехточечную некогерентную модель, обеспечивающую эквивалентные значения параметров ПРВ УШ.

Очевидно, что переход выполняется аналогично для модели-проекции на ось  $OY$ . Для упрощения дальнейших записей обратимся к обобщенной оси  $\xi$ . Для краткости не будем пояснять обозначения каждого из параметров, т.к. они однозначно соответствуют параметрам, рассмотренным для модели-проекции на ось  $OX$ . Запишем выражения для границ физической реализуемости перехода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\xi_1}^2 = A_{\xi_1}^2 + U_{\xi_1}^2; \\ \sigma_{\xi_2}^2 = A_{\xi_2}^2 + U_{\xi_2}^2; \\ r_{\xi} = \frac{A_{\xi_1} A_{\xi_2}}{\sigma_{\xi_1} \sigma_{\xi_2}}; \\ \Delta\xi = \frac{1 - z_{\xi}}{1 + z_{\xi}}, \end{array} \right. \quad (2.2.10)$$

где  $z_{\xi} = \frac{n_{\xi_1} A_{\xi_1}}{n_{\xi_2} A_{\xi_2}}$ .

С учетом неопределенного значения  $\Delta\xi$  можно записать решение системы (2.2.10) как

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\xi_1}^2 = \frac{1 - \Delta\xi}{1 + \Delta\xi} \cdot r_{\xi} \cdot \sigma_{\xi_1} \cdot \sigma_{\xi_2}; \\ A_{\xi_2}^2 = \frac{1 + \Delta\xi}{1 - \Delta\xi} \cdot r_{\xi} \cdot \sigma_{\xi_1} \cdot \sigma_{\xi_2}; \\ U_{\xi_1}^2 = \sigma_{\xi_1}^2 - \frac{1 - \Delta\xi}{1 + \Delta\xi} \cdot r_{\xi} \cdot \sigma_{\xi_1} \cdot \sigma_{\xi_2}; \\ U_{\xi_2}^2 = \sigma_{\xi_2}^2 - \frac{1 + \Delta\xi}{1 - \Delta\xi} \cdot r_{\xi} \cdot \sigma_{\xi_1} \cdot \sigma_{\xi_2}. \end{array} \right. \quad (2.2.11)$$

Границы диапазона, в пределах которого могут лежать параметры ПРВ угловых шумов, формируемых моделью описаны в выражении (2.1.3). Границы эквивалентности, определенные через диапазон возможных значений параметра  $\Delta\xi$  приведены в выражениях (2.1.4), а через диапазон значений параметра  $z_{\xi}$  – в выражениях (2.1.5).

Таким образом, выражения (2.2.10) и (2.2.11) позволяют определить параметры перехода от трехточечной некогерентной неэквидистантной модели к двухточечной частично когерентной модели-проекции, обеспечивающей требуемые значения параметров ПРВ угловых шумов вдоль соответственной оси координат. Выражения (2.1.3) – (2.1.5) определяют границы эквивалентности.

Перейдем к двумерным некогерентным моделям. Проекциями и пятиточечной, и девятиточечной некогерентной модели на оси координат  $OX$  и

$OY$  являются трехточечные некогерентные модели [62]. Поэтому для упрощения записи рассмотрим обе двумерные некогерентные модели одновременно.

Пусть имеется пять (для пятиточечной модели) или девять (для девятиточечной модели) излучателей нормальных некоррелированных случайных процессов  $u_i(t)$  с СКО  $U_i$ , где  $i$  – номер излучателя модели. Координаты излучателей определяются их расположением относительно двух угловых осей координат:  $OX$  и  $OY$ . Для пятиточечной некогерентной модели излучатели 1..4 расположены в вершинах квадрата со стороной 2 так, как показано белыми маркерами-кругами на рис. 2.2.3-а), а пятый излучатель располагается внутри этого квадрата. Для девятиточечной модели излучатели располагаются так, как показано на рис. 2.2.3-б) и пронумерованы слева-направо сверху-вниз.

Проекциями обеих двумерных некогерентных моделей на оси координат являются трехточечные некогерентные модели, точки которых обозначены черными маркерами-квадратами на рис. 2.2.3.

Как было показано ранее, проекциями искомой двумерной четырехточечной частично когерентной модели на оси координат являются двухточечные частично когерентные модели. Как было показано в разделе 1, для одномерной двухточечной частично когерентной модели можно подобрать эквивалентную ей трехточечную некогерентную модель. Таким образом, эквивалентность проекций четырехточечной частично когерентной модели и пяти- или девятиточечной некогерентной означает эквивалентность и самих моделей. Выражения (2.1.3) и (2.1.4) для двух осей координат определяют границы этой эквивалентности.

Получим выражения, позволяющие перейти от двумерной некогерентной модели к двумерной четырехточечной частично когерентной.

Запишем выражения для дисперсий сигналов проекций двумерных некогерентных моделей на оси координат.

Т.к. сигналы некогерентных моделей некоррелированы, то выражения для дисперсий сигналов проекций пятиточечной модели соответственно имеют вид:

$$\begin{cases} U_{x_1}^2 = U_1^2 + U_3^2; \\ U_{x_2}^2 = U_2^2 + U_4^2; \\ U_{x_3}^2 = U_5^2; \\ U_{y_1}^2 = U_3^2 + U_4^2; \\ U_{y_2}^2 = U_1^2 + U_2^2; \\ U_{y_3}^2 = U_5^2. \end{cases} \quad (2.2.12)$$

Для девятиточечной модели:

$$\begin{cases} U_{x_1}^2 = U_1^2 + U_4^2 + U_7^2; \\ U_{x_2}^2 = U_3^2 + U_6^2 + U_9^2; \\ U_{x_3}^2 = U_2^2 + U_4^2 + U_6^2; \\ U_{y_1}^2 = U_7^2 + U_8^2 + U_9^2; \\ U_{y_2}^2 = U_1^2 + U_2^2 + U_3^2; \\ U_{y_3}^2 = U_4^2 + U_5^2 + U_6^2. \end{cases} \quad (2.2.13)$$

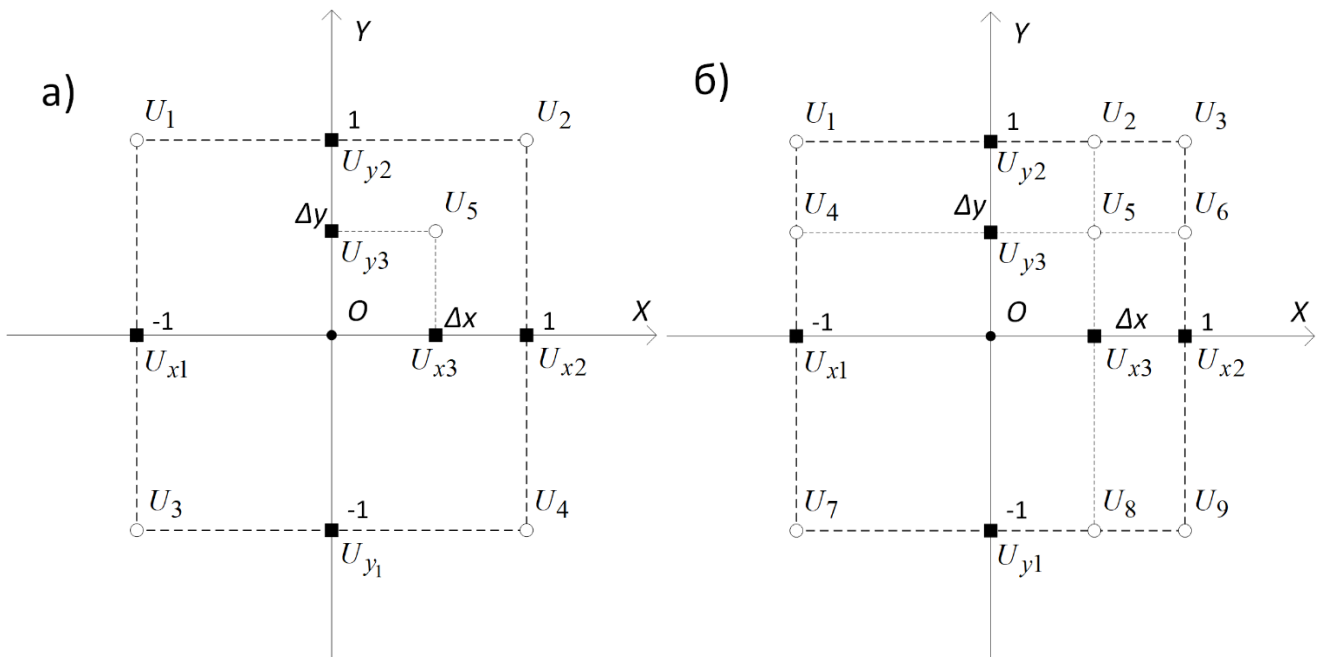


Рисунок 2.2.3 – Двумерные некогерентные модели и их проекции на оси координат



На основе выражений и (2.2.12) – (2.2.13) определяются параметры частично проекций когерентной модели, приведенные в выражениях (2.1.1) – (2.1.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{x_1}^2 = A_{x_1}^2 + U_{x_1}^2; \\ \sigma_{x_2}^2 = A_{x_2}^2 + U_{x_2}^2; \\ \sigma_{y_1}^2 = A_{y_1}^2 + U_{y_1}^2; \\ \sigma_{y_2}^2 = A_{y_2}^2 + U_{y_2}^2; \\ r_x = \frac{n_{x_1} n_{x_2} A_{x_1} A_{x_2}}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}}; \\ r_y = \frac{n_{y_1} n_{y_2} A_{y_1} A_{y_2}}{\sigma_{y_1} \sigma_{y_2}}; \\ \Delta x = \frac{1 - z_x}{1 + z_x}; \\ \Delta y = \frac{1 - z_y}{1 + z_y}. \end{array} \right. \quad (2.2.14)$$

Значения  $r_x$ ,  $r_y$  и  $\gamma_x = \frac{\sigma_{x_2}}{\sigma_{x_1}}$ ,  $\gamma_y = \frac{\sigma_{y_2}}{\sigma_{y_1}}$  при этом определяются по

выражениям (1.5.2), связывающим параметры ПРВ угловых шумов и параметры сигналов, подводимых к точкам двухточечных частично когерентных моделей-проекций.

Необходимые значения СКО сигналов четырехточечной частично когерентной модели определены в [155]. В рамках принятых обозначений они могут представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{\sigma_{y_2}}{\sqrt{1 + 2r_x \gamma_x + \gamma_x^2}}; \\ \sigma_2 = \gamma_y \cdot \sigma_4; \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_1}{\gamma_y}; \\ \sigma_4 = \frac{\sigma_{x_2}}{\sqrt{1 + 2r_y \gamma_y + \gamma_y^2}}. \end{array} \right. \quad (2.2.15)$$

Запишем алгоритм расчета СКО сигналов, подводимых к точкам искомой частично когерентной модели:

1) По выражениям (2.2.12) – (2.2.15) на основе заданных дисперсий сигналов двумерной некогерентной модели осуществляется переход к дисперсиям проекций этой модели на оси координат;

2) На основе выражений (1.5.2) и (2.1.1) осуществляется расчет параметров, необходимых для перехода между проекциями некогерентной и частично когерентной моделей на оси координат;

3) По выражениям (2.2.10) осуществляется расчет дисперсий, соответствующих точкам проекций искомой частично когерентной модели на оси координат;

4) По выражениям (2.2.15) осуществляется расчет СКО сигналов, подводимых к излучателям искомой четырехточечной частично когерентной модели.

Таким образом, реализацией двух переходов из пяти- или девятиточечной двухмерной некогерентной модели получается двумерная четырехточечная частично когерентная модель. Дисперсии или СКО сигналов моделей определяются по выражениям (2.2.8), (2.2.12) – (2.2.14). Выражения (2.2.10) – (2.2.11) позволяют определить параметры, необходимые для осуществления переходов, а выражения (2.1.3) – (2.1.5) определяют границы эквивалентности для моделей-проекций на оси координат.

### 2.3. Программное моделирование

На основе полученных теоретических результатов проведено программное моделирование. Моделировался прием сигналов двумерной девятиточечной некогерентной модели и двумерной четырехточечной частично когерентной, расположенных вдоль обобщенных осей координат  $OX$  и  $OY$ . Излучатели моделей расположены так, как показано на рис. 2.2.2 и 2.3.3(б), в диапазоне значений обобщенных угловых координат  $x \in [-1;1]$  и  $y \in [-1;1]$ . Заданные параметры ПРВ:  $m_x = 0.5$ ,  $\mu_x = 5$ ,  $m_y = -0.2$ ,  $\mu_y = 3$ . При этом  $\Delta x = m_x$  и  $\Delta y = m_y$ , что удовлетворяет условиям эквивалентности рассматриваемых моделей, приведенным в выражениях (2.1.3) – (2.1.5). Количество отсчетов в реализациях сигналов равно 30000. Относительная полоса частот, занимаемая сигналами равна 4%. Результатом моделирования является сравнение ПРВ пеленга для рассматриваемых моделей, оцененных методом моноимпульсной пеленгации, подробно описанным в [39,151,153], а также СКО сигналов, подводимых к точкам моделей, полученные в результате моделирования параметры ПРВ. Усреднение ПРВ проводилось по 20 реализациям. Сходимость зависимостей ПРВ проверялась по критерию  $\chi^2$ -Пирсона с поправкой Йейтса при допустимом уровне ложной тревоги 0.05 как для оси  $OX$ , так и для оси  $OY$ .

В таблицах 2.3.1 и 2.3.2 приведены значения СКО сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели, рассчитанные на основе заданных параметров ПРВ угловых шумов и параметров  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . В таблице 2.3.3 приведены полученные в результате моделирования параметры ПРВ для осей  $OX$  и  $OY$ . На рис. 2.3.1 приведено сравнение полученных в результате моделирования ПРВ пеленга для рассматриваемых моделей. Допустимое значение критерия согласия Пирсона для ПРВ по оси  $OX$  равно  $\chi^2 = 72.1532$ , для оси  $OY$  равно  $\chi^2 = 88.2502$ . Рассчитанное значение для оси  $OX$  составило 4.1887, для оси  $Y$ : 6.5786.

Таблица 2.3.1 – СКО сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели

Номер точки модели	СКО, отн. ед.
1	0.216
2	0.6421
3	0.0632
4	0.2921
5	2.9157
6	0.506
7	0.0365
8	0.7437
9	0.3742

Таблица 2.3.2 – СКО сигналов, подводимых к точкам искомой частично когерентной модели

Номер точки модели	1	2	3	4
СКО, отн. ед.	0.369	1.0368	0.5302	1.49

Таблица 2.3.3 – Параметры смоделированных ПРВ угловых шумов

Некогерентная модель		Частично когерентная модель	
$m_x$	0.4994	$m_x$	0.4993
$\mu_x$	5.1205	$\mu_x$	5.0542
$m_y$	-0.1999	$m_y$	-0.1986
$\mu_y$	3.0299	$\mu_y$	3.0396

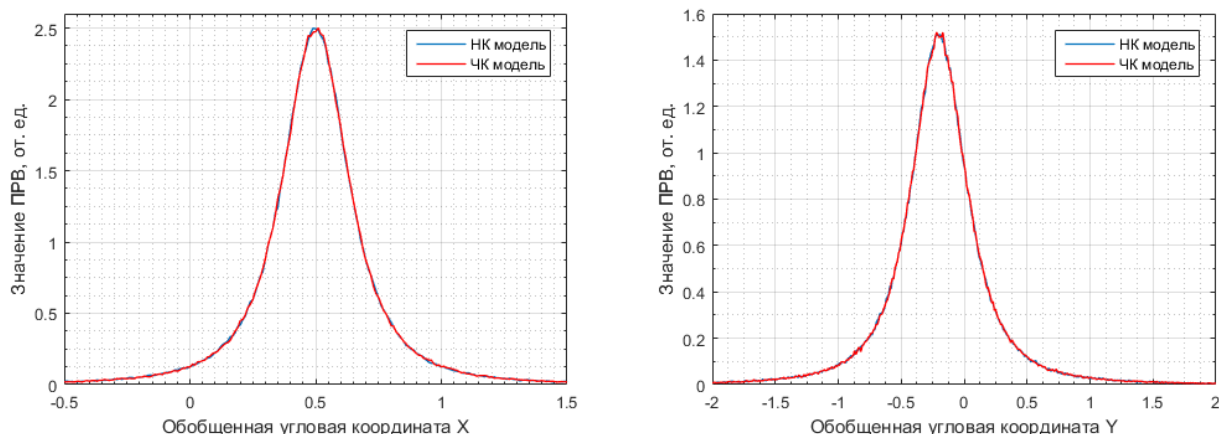


Рисунок 2.3.1 – Сравнение ПРВ пеленга двумерной четырехточечной частично когерентной модели и девятиточечной некогерентной для осей  $OX$  и  $OY$  соответственно

Для проверки условий эквивалентности моделей (2.1.3) – (2.1.5) проведено моделирование для значений параметров  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , лежащих за пределами разрешенного в (2.1.4) диапазона:

$$\begin{cases} \Delta x = \begin{cases} 1.3\Delta x_{\max}, m_x \geq 0; \\ 1.3\Delta x_{\min}, m_x < 0; \end{cases} \\ \Delta y = \begin{cases} 1.3\Delta y_{\max}, m_y \geq 0; \\ 1.3\Delta y_{\min}, m_y < 0; \end{cases} \end{cases}$$

Остальные параметры модели оставались неизменными.

В таблице 2.3.4 приведены значения рассчитанных параметров  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и соответствующие им границы разрешенного диапазона. На рис. 2.3.2 приведено сравнение зависимостей ПРВ пеленга исходной девятиточечной некогерентной модели и искомой четырехточечной частично когерентной. В таблицах 2.3.5 и 2.3.6 приведены значения СКО сигналов, подводимых к точкам модели, рассчитанные на основе заданных параметров ПРВ угловых шумов и параметров  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . В таблице 2.3.7 приведены полученные в результате моделирования параметры ПРВ для осей  $OX$  и  $OY$ .

Таблица 2.3.4 – Значения  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и соответствующие им границы разрешенного диапазона, используемые при моделировании

Используемые значения		Границы допустимых значений			
$\Delta x$	0.6847	$\Delta x_{\min}$	0.42	$\Delta x_{\max}$	0.5267
$\Delta y$	-0.3804	$\Delta y_{\min}$	-0.2926	$\Delta y_{\max}$	-0.0611

Таблица 2.3.5 – СКО сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели

Номер точки модели	СКО, отн. ед.
1	0.371
2	0.9084
3	$0.194 \cdot i$
4	0.5014
5	3.4754
6	$1.551 \cdot i$
7	0.0627
8	0.679
9	$1.147 \cdot i$

Таблица 2.3.6 – СКО сигналов, подводимых к точкам искомой частично когерентной модели

Номер точки модели	1	2	3	4
СКО, отн. ед.	0.369	1.0368	0.5302	1.49

Таблица 2.3.7 – Параметры смоделированных ПРВ угловых шумов

Некогерентная модель		Частично когерентная модель	
$m_x$	0.7108	$m_x$	0.4986
$\mu_x$	3.5095	$\mu_x$	5.0708

$m_y$	-0.3172	$m_y$	-0.2004
$\mu_y$	2.4333	$\mu_y$	3.0322

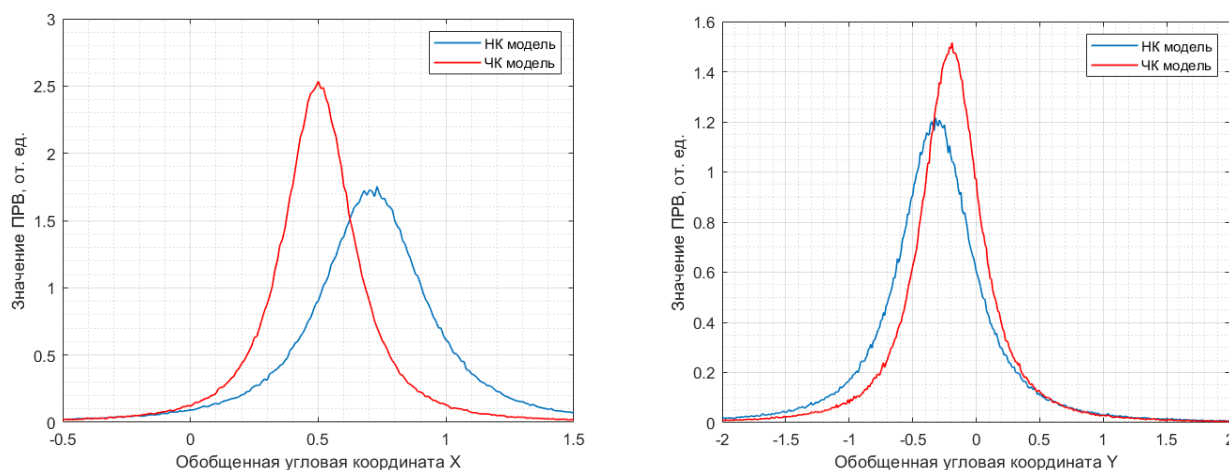


Рисунок 2.3.2 – Сравнение ПРВ пеленга двумерной четырехточечной частично когерентной модели и девятиточечной некогерентной для осей  $OX$  и  $OY$  соответственно при невыполнении условий физической реализуемости эквивалентности

Как видно по рис. 2.3.2, зависимости ПРВ пеленга моделей заметно расходятся. Требуемые значения параметров ПРВ не обеспечиваются. Допустимое значение критерия согласия Пирсона по оси  $OX$  составило  $\chi^2 = 72.1532$ , а по оси  $OY$ :  $\chi^2 = 88.2502$  рассчитанное значение для ПРВ по оси  $OX$ : 39312.0136, по оси  $OY$ : 5089.8937. Искомая частично когерентная модель и заданная некогерентная согласно условиям (2.1.3) – (2.1.5) не являются эквивалентными, однако, свойство (2.1.1) позволяет синтезировать частично когерентную модель, обеспечивающую заданные параметры ПРВ вдоль ортогональных осей координат даже когда по этим параметрам невозможно синтезировать физически реализуемую некогерентную модель.

## 2.4. Сравнение пятиточечной и девятиточечной некогерентных моделей

Двумерная некогерентная модель является основой для синтеза двумерной частично когерентной модели. Т.к. пятиточечная и девятиточечная модели имеют собственные преимущества и недостатки, имеет смысл провести краткое сравнение этих двумерных некогерентных моделей.

Пятиточечная модель, как показано в [62,142], обеспечивает независимое регулирование параметров ПРВ угловых шумов вдоль двух ортогональных осей координат. Такая модель по сравнению с девятиточечной обладает меньшим количеством излучателей и, следовательно, меньшим количеством параметров, используемых в расчетах при синтезе и переходе к частично когерентной модели. Однако пятиточечная некогерентная модель имеет существенный недостаток.

Пятый излучатель пятиточечной некогерентной модели проецируется на обе оси координат. Т.е. установка мощности подводимого к нему сигнала по требованиям к параметрам угловых шумов по оси  $OX$  автоматически устанавливает равную мощность и для оси  $OY$ . Это означает связь между моделями-проекциями и, следовательно, ограничение на независимое регулирование параметров ПРВ вдоль осей координат.

Эта проблема рассмотрена в [142], где получено выражение (2.4.1), связывающее параметры ПРВ для обеих осей координат в рамках ограничений, описанных выше.

$$\mu_y = \frac{1}{\sqrt{y_2^2 + \frac{y_2^2 - \Delta y^2}{x_2^2 - \Delta x^2} \cdot \left( m_x^2 - x_2^2 + \frac{1}{\mu_x^2} \right) - m_y^2}}, \quad (2.4.1)$$

где  $x_2$  и  $y_2$  - координаты точек моделей-проекций под номером 2, соответствующие положительным участкам осей координат на рис. 2.2.3.

Синтез модели возможен только для параметров ПРВ  $(m_x, \mu_x)$  и  $(m_y, \mu_y)$ , удовлетворяющих выражению (2.4.1). Некогерентная модель является виртуальной основой для синтеза частично когерентной модели, поэтому можно



воспользоваться подвижностью пятого излучателя, изменяя его координаты  $(\Delta x, \Delta y)$ .

Преобразуем (2.4.1) для получения выражения (2.4.2), определяющего функциональную зависимость  $\Delta y(\Delta x)$ :

$$\Delta y(\Delta x) = \sqrt{1 - (1 - \Delta x^2) \frac{m_y^2 + \frac{1}{\mu_y^2} - 1}{m_x^2 + \frac{1}{\mu_x^2} - 1}}. \quad (2.4.2)$$

В системе выражений (2.4.3) на основе (2.1.4) и (2.4.2) определены разрешенные значения координат пятого излучателя некогерентной модели по заданным параметрам ПРВ угловых шумов. Первые два выражения в системе определяют границы области эквивалентности некогерентной и частично когерентной моделей согласно (2.1.4). Третье выражение – все возможные значения координат пятого излучателя, для которых синтезируется некогерентная модель согласно (2.4.2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\mu_x^2 \cdot m_x \cdot (1 - m_x) - 1}{\mu_x^2 (1 - m_x)} \leq \Delta x \leq \frac{1 + \mu_x^2 \cdot m_x \cdot (1 + m_x)}{\mu_x^2 (1 + m_x)}; \\ \frac{\mu_y^2 \cdot m_y \cdot (1 - m_y) - 1}{\mu_y^2 (1 - m_y)} \leq \Delta y \leq \frac{1 + \mu_y^2 \cdot m_y \cdot (1 + m_y)}{\mu_y^2 (1 + m_y)}; \\ \Delta y(\Delta x) = \sqrt{1 - (1 - \Delta x^2) \frac{m_y^2 + \frac{1}{\mu_y^2} - 1}{m_x^2 + \frac{1}{\mu_x^2} - 1}}. \end{array} \right. \quad (2.4.3)$$

Для произвольных значений параметров ПРВ УШ  $(m_x, \mu_x)$  и  $(m_y, \mu_y)$  возможен синтез пятиточечной некогерентной и, следовательно, четырехточечной частично когерентной модели, допускающей независимое регулирование

параметров ПРВ УШ по двум осям координат, только в том случае, если относительно этих параметров система (2.4.3) имеет как минимум одно решение.

Девятиточечная некогерентная модель свободна от такого ограничения за счет большего количества излучающих точек. Для девятиточечной модели в формировании сигнала и мощности каждой точки проекции всегда участвует сразу три излучателя исходной модели. Например, в третью точку модели-проекции на ось  $OX$ , как следует из выражения (2.2.12), проецируются излучатели 2, 5 и 8, а на ось  $OY$  – излучатели 4,5 и 6. Таким образом, мощность только одного из трех излучателей исходной модели является общей для моделей-проекций, что обеспечивает возможность синтеза некогерентных моделей, обеспечивающих независимое регулирование параметров ПРВ УШ для всех значений  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , удовлетворяющих условиям (2.1.4).

## 2.5. Заключение по второму разделу

В разделе доказана эквивалентность двумерной четырехточечной частично когерентной модели и двумерной пяти- и девятиточечной некогерентных моделей через эквивалентность параметров ПРВ УШ, обеспечиваемых проекциями этих моделей на оси координат.

Получены выражения (2.1.1) – (2.1.2), позволяющие перейти от одномерной трехточечной некогерентной модели к двухточечной частично когерентной. Выражения (2.1.3) – (2.1.5) определяют границы эквивалентности.

Получены соотношения (2.2.13) – (2.2.15) позволяющие осуществить переход от пятиточечной и девятиточечной некогерентной модели к четырехточечной частично когерентной.

Показаны недостатки пятиточечной некогерентной модели как основы для синтеза четырехточечной частично когерентной. Приведено выражение, связывающее значения параметров ПРВ угловых шумов по двум осям координат, для которых возможен синтез пятиточечной некогерентной модели, обеспечивающей заданные параметры ПРВ угловых шумов. Получены выражения (2.4.2) и (2.4.3), определяющие границы возможного значения координат пятого

подвижного излучателя пятиточечной некогерентной модели, в пределах которых модель обеспечивает заданные параметры ПРВ угловых шумов.

Полученные в разделе теоретические результаты проверены программным моделированием. Проверка заключалась в оценке сходимости зависимостей ПРВ угловых шумов, обеспечиваемых двумерной девятиточечной некогерентной и четырехточечной частично когерентной моделями при выполнении и невыполнении условий (2.1.3) – (2.1.5). Сходимость зависимостей подтверждена по критерию согласия Пирсона с поправкой Йейтса.

### **3. Синтез частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов**

В разделе 2 был рассмотрен синтез частично когерентных моделей, обеспечивающих требуемые параметры ПРВ угловых шумов на основе известных эквивалентных им некогерентных моделей. Однако для достоверного моделирования угловых шумов необходимо также обеспечить их спектрально-корреляционные характеристики (СКХ), определяемые авто- и взаимными корреляционными функциями сигналов, подводимых к точкам модели, или соответственными спектральными плотностями мощности [41,62–63,101].

Методы расчета КФ сигналов для некогерентных моделей, обеспечивающих требуемые спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов, в настоящее время подробно проработаны и описаны в литературе [62,138,140,156–158]. Эквивалентность некогерентных и частично когерентных моделей предполагает возможность определения КФ сигналов для частично когерентных моделей на основе соответственных функций для некогерентных моделей.

Цель раздела 3: обосновать способ синтеза частично когерентных моделей, формирующих угловые шумы с заданными спектрально-корреляционными характеристиками, на основе эквивалентности таких моделей известным некогерентным.

Для достижения поставленных целей решены следующие задачи.

1. Получены выражения, определяющие взаимосвязь спектрально-корреляционных характеристик сигналов, излучаемых двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной моделями, обеспечивающими одинаковую корреляционную функцию угловых шумов.

2. Получены выражения, определяющие взаимосвязь спектрально-корреляционных характеристик сигналов, излучаемых четырехточечной частично когерентной и двумерными пяти- и девятиточечными некогерентными моделями, обеспечивающими одинаковую корреляционную функцию угловых шумов.

### 3.1. Определение спектрально-корреляционных характеристик для одномерных моделей

Рассмотрим одномерную трехточечную некогерентную модель, обеспечивающую требуемые спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов [62,137].

Пусть имеется три излучателя нормальных некоррелированных случайных процессов  $u_i(t)$  с СКО  $U_i$ , где  $i$  – номер излучателя модели. АКФ и ВКФ квадратурных компонент этих случайных процессов  $R_i(\tau)$  и  $S_i(\tau)$  соответственно. Координаты излучателей определяются их расположением относительно обобщенной угловой координаты  $\xi$ . Нормированные координаты излучателей равны  $\xi_1 = -1$ ,  $\xi_2 = 1$  и  $\xi_3 = \Delta\xi$ , где  $\Delta\xi \in (-1;1)$ . Расположение точек модели изображено на рис. 3.1.1.

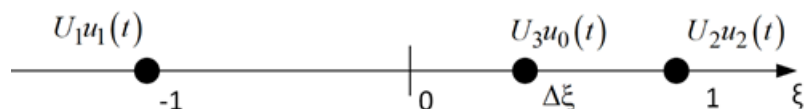


Рисунок 3.1.1 – Трехточечная некогерентная модель

Запишем выражения для АКФ квадратурных компонент сигналов некогерентной модели:

$$\begin{cases} R_{\xi_1}(\tau) = U_1^2 \int u_1(\tau)u_1(t + \tau)dt; \\ R_{\xi_2}(\tau) = U_2^2 \int u_2(\tau)u_2(t + \tau)dt; \\ R_{\xi_3}(\tau) = U_3^2 \int u_3(\tau)u_3(t + \tau)dt. \end{cases} \quad (3.1.1)$$

Как было показано в разделе 2, для такой трехточечной некогерентной модели можно подобрать эквивалентную ей двухточечную частично когерентную.

Рассмотрим такую двухточечную частично когерентную модель.

Пусть излучающие точки частично когерентной двухточечной модели имеют координаты  $\xi_1 = -1$  и  $\xi_2 = 1$ , совпадающие с координатами крайних точек некогерентной модели. К точкам подводятся нормальные коррелированные

случайные процессы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  с СКО  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и коэффициентом взаимной корреляции  $r_\xi$ . АКФ и ВКФ их квадратурных компонент:  $B_{\xi_1}(\tau)$ ,  $B_{\xi_2}(\tau)$ ,  $C_{\xi_1}(\tau)$  и  $C_{\xi_2}(\tau)$  соответственно. Обозначим взаимную корреляционную функцию двух излучаемых сигналов как  $B_{\xi_{12}}(\tau)$  для одноименных квадратур сигналов и как  $C_{\xi_{12}}(\tau)$  для разноименных. Расположение точек такой модели приведено на рис. 3.1.2.

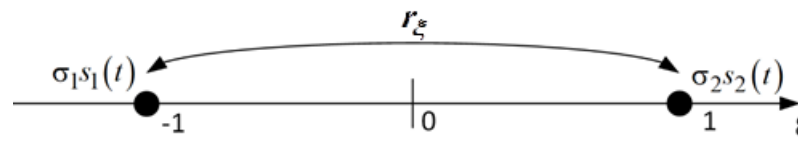


Рисунок 3.1.2 – Двухточечная частично когерентная модель

С учетом эквивалентности моделей, рассмотренной в разделе 1, сигналы и их СКО для двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной моделей связаны следующими выражениями [150,159]:

$$\begin{cases} \sigma_1 s_1(t) = n_1 A_1 u_3(t) + U_1 u_1(t); \\ \sigma_2 s_2(t) = n_2 A_2 u_3(t) + U_2 u_2(t), \end{cases} \quad (3.1.2)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  являются знаковыми множителями и принимают значения 1 или  $-1$  с целью обеспечения знака при коэффициенте взаимной корреляции  $r_\xi$  сигналов частично когерентной модели.

Наличие составляющих  $n_1 A_1 u_3(t)$  и  $n_2 A_2 u_3(t)$  в выражениях (3.1.2) для сигналов частично когерентной модели является перераспределением сигнала третьей точки некогерентной модели. Наличие когерентных составляющих в сигналах частично когерентной модели определяет взаимную корреляцию этих сигналов. Значения СКО  $A_1$  и  $A_2$  при составляющих  $u_3(t)$  определяет модуль коэффициента взаимной корреляции сигналов  $|r_\xi|$ . Значения  $A_1$  и  $A_2$  зависят от

положения  $\Delta\xi$  третьего излучателя некогерентной модели. Эта зависимость выражается через параметр  $z_\xi = \frac{n_1 \cdot A_1}{n_2 \cdot A_2} = \frac{1 - \Delta\xi}{1 + \Delta\xi}$ .

Выражения (3.1.2) описывают связь между сигналами трехточечной некогерентной и двухточечной частично когерентной моделей. Воспользуемся известной связью между сигналами моделей для определения связи между соответственными корреляционными функциями.

Проведем анализ выражения (3.1.1) для АКФ сигнала, излучаемого первой точкой частично когерентной модели, согласно (3.1.2):

$$\begin{aligned} B_{\xi_1}(\tau) &= \sigma_1^2 \int s_1(\tau) s_1(t + \tau) dt = \\ &= \int (n_1 \cdot A_1 \cdot u_3(\tau) + U_1 \cdot u_1(\tau)) (n_1 \cdot A_1 \cdot u_3(t + \tau) + U_1 \cdot u_1(t + \tau)) dt = \\ &= A_1^2 \int u_3(\tau) u_3(t + \tau) dt + U_1^2 \int u_1(\tau) u_1(t + \tau) dt = \frac{A_1^2}{U_3^2} R_{\xi_3}(\tau) + R_{\xi_1}(\tau). \end{aligned}$$

АКФ сигнала, излучаемого второй точкой частично когерентной модели согласно (3.1.3):

$$\begin{aligned} B_{\xi_2}(\tau) &= \sigma_2^2 \int s_2(\tau) s_2(t + \tau) dt = \\ &= \int (n_2 \cdot A_2 \cdot u_3(\tau) + U_2 \cdot u_2(\tau)) (n_2 \cdot A_2 \cdot u_3(t + \tau) + U_2 \cdot u_2(t + \tau)) dt = \\ &= A_2^2 \int u_3(\tau) u_3(t + \tau) dt + U_2^2 \int u_2(\tau) u_2(t + \tau) dt = \frac{A_2^2}{U_3^2} R_{\xi_3}(\tau) + R_{\xi_2}(\tau). \end{aligned}$$

ВКФ сигналов, излучаемых точками частично когерентной модели согласно (3.1.3):

$$\begin{aligned} B_{\xi_{12}}(\tau) &= \sigma_1 \sigma_2 \int s_1(\tau) s_2(t + \tau) dt = \\ &= \int (n_1 \cdot A_1 \cdot u_3(\tau) + U_1 \cdot u_1(\tau)) (n_2 \cdot A_2 \cdot u_3(t + \tau) + U_2 \cdot u_2(t + \tau)) dt = \\ &= n_1 \cdot A_1 \cdot n_2 \cdot A_2 \cdot \int u_3(\tau) u_3(t + \tau) dt = \frac{z_\xi A_2^2}{U_3^2} R_{\xi_3}(\tau). \end{aligned}$$

Сведем полученные результаты в систему (3.1.5) и получим выражения [160], связывающие КФ квадратур сигналов, подводимых к двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной.

$$\begin{cases} B_{\xi_1}(\tau) = \frac{A_1^2}{U_3^2} R_{\xi_3}(\tau) + R_{\xi_1}(\tau); \\ B_{\xi_{12}}(\tau) = \frac{A_2^2}{U_3^2} R_{\xi_3}(\tau) + R_{\xi_2}(\tau); \\ B_{\xi_{12}}(\tau) = \frac{z_\xi A_2^2}{U_3^2} R_{\xi_3}(\tau). \end{cases} \quad (3.1.3)$$

Упростим выражения (3.1.3), выделив в них параметр  $z_\xi$ .

$$\begin{cases} B_{\xi_1}(\tau) = R_{\xi_1}(\tau) + z_\xi B_{\xi_{12}}(\tau); \\ B_{\xi_2}(\tau) = R_{\xi_2}(\tau) + \frac{B_{\xi_{12}}(\tau)}{z_\xi}; \\ B_{\xi_{12}}(\tau) = \frac{z_\xi A_2^2}{U_3^2} R_3(\tau). \end{cases} \quad (3.1.4)$$

Выражения для ВКФ квадратурных компонент сигналов частично когерентной модели получаются аналогичным образом:

$$\begin{cases} C_{\xi_1}(\tau) = \frac{A_1^2}{U_3^2} S_{\xi_3}(\tau) + S_{\xi_1}(\tau); \\ C_{\xi_2}(\tau) = \frac{A_2^2}{U_3^2} S_{\xi_3}(\tau) + S_{\xi_2}(\tau); \\ C_{\xi_{12}}(\tau) = \frac{z_\xi A_2^2}{U_3^2} S_{\xi_3}(\tau). \end{cases} \quad (3.1.5)$$

Перейдем от выражений для АКФ в (3.1.4) и (3.1.5) к выражениям для СПМ, применив теорему Винера-Хинчина [152,153]:



$$\left\{ \begin{array}{l} W_{B_{\xi_1}}(\omega) = G_{R_{\xi_1}}(\omega) + z_{\xi} G_{R_{\xi_{12}}}(\omega); \\ W_{B_{\xi_2}}(\omega) = G_{R_{\xi_2}}(\omega) + \frac{G_{R_{\xi_{12}}}(\omega)}{z_{\xi}}; \\ W_{B_{\xi_{12}}}(\omega) = \frac{z_{\xi} A_2^2}{U_3^2} G_{R_{\xi_3}}(\omega); \end{array} \right. \quad (3.1.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{C_{\xi_1}}(\omega) = G_{S_{\xi_1}}(\omega) + z_{\xi} G_{S_{\xi_{12}}}(\omega); \\ W_{C_{\xi_2}}(\omega) = G_{S_{\xi_2}}(\omega) + \frac{G_{S_{\xi_{12}}}(\omega)}{z_{\xi}}; \\ W_{C_{\xi_{12}}}(\omega) = \frac{z_{\xi} A_2^2}{U_3^2} G_{S_{\xi_3}}(\omega), \end{array} \right. \quad (3.1.7)$$

где СПМ, соответствующие корреляционным функциям  $R_i(\tau)$  и  $S_i(\tau)$  сигналов некогерентной модели:  $G_{R_{\xi_j}}(\omega)$  и  $G_{S_{\xi_j}}(\omega)$ , а СПМ, соответствующие корреляционным функциям  $B_{\xi_1}(\tau)$ ,  $B_{\xi_2}(\tau)$ ,  $B_{\xi_{12}}(\tau)$  и  $C_{\xi_1}(\tau)$ ,  $C_{\xi_2}(\tau)$ ,  $C_{\xi_{12}}(\tau)$  сигналов частично когерентной модели:  $W_{B_{\xi_1}}(\omega)$ ,  $W_{B_{\xi_2}}(\omega)$ ,  $W_{B_{\xi_{12}}}(\omega)$  и  $W_{C_{\xi_1}}(\omega)$ ,  $W_{C_{\xi_2}}(\omega)$ ,  $W_{C_{\xi_{12}}}(\omega)$  соответственно.

Таким образом, КФ или СПМ квадратур сигналов, подводимых к точкам частично когерентной модели, получаются из КФ или СПМ квадратур сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели, путем перераспределения сигнала третьей точки некогерентной модели, имеющей координату  $\Delta\xi$ , по сигналам для двух других точек. Перераспределение зависит от значения параметра  $z_{\xi}$ , который определяется координатой  $\Delta\xi$  третьей точки некогерентной модели и, следовательно, параметрами ПРВ УШ  $m_{\xi}$  и  $\mu_{\xi}$ .

Рассмотрим частный случай: замещаемый распределенный объект обладает свойством делимости пространственной и временной координаты. В этом случае авто- и взаимные корреляционные функции квадратурных компонент

сигналов малоточечной некогерентной модели имеют одинаковую форму, определяемую соответствующими функциями эхосигнала от замещаемого объекта [62,156–158]. То же касается и СПМ сигналов некогерентной модели. Это означает, что сигналы, излучаемые из точек модели отличаются лишь мощностью.

Получим соотношения, позволяющие для такого объекта осуществить переход от некогерентной модели к частично когерентной.

Пусть  $\sigma_H^2 = U_1^2 + U_2^2 + U_3^2$  – сумма дисперсий сигналов, подводимых к точкам трехточечной некогерентной модели, а  $R_\infty(\tau)$  – АКФ суммы этих сигналов. Тогда очевидно, что  $R_\infty(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau) + R_3(\tau)$ .

Перепишем выражения (3.1.1) для объекта с разделимостью пространственной и временной (частотной) координаты согласно [62,156].

$$\begin{cases} R_{\xi_1}(\tau) = \frac{U_1^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \\ R_{\xi_2}(\tau) = \frac{U_2^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \\ R_{\xi_3}(\tau) = \frac{U_3^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau). \end{cases} \quad (3.1.8)$$

Запишем выражения (3.1.4) и (3.1.6) с учетом (3.1.8).

$$\begin{cases} B_{\xi_1}(\tau) = \frac{A_1^2 + U_1^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \\ B_{\xi_2}(\tau) = \frac{A_2^2 + U_2^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \\ B_{\xi_{12}}(\tau) = \frac{z_\xi A_2^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \end{cases} \quad \begin{cases} W_{B_{\xi_1}}(\omega) = \frac{A_1^2 + U_1^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega); \\ W_{B_{\xi_2}}(\omega) = \frac{A_2^2 + U_2^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega); \\ W_{B_{\xi_{12}}}(\omega) = \frac{z_\xi A_2^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega). \end{cases} \quad (3.1.9)$$

Аналогичным образом получают выражения для ВКФ и соответствующих им СПМ квадратур сигналов, подводимых к точкам модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\xi_1}(\tau) = \frac{A_1^2 + U_1^2}{\sigma_H^2} C_\infty(\tau); \\ C_{\xi_2}(\tau) = \frac{A_2^2 + U_2^2}{\sigma_H^2} C_\infty(\tau); \\ C_{\xi_{12}}(\tau) = \frac{z_\xi A_2^2}{\sigma_H^2} C_\infty(\tau); \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} W_{C_{\xi_1}}(\omega) = \frac{A_1^2 + U_1^2}{\sigma_H^2} G_{C_\infty}(\omega); \\ W_{C_{\xi_2}}(\omega) = \frac{A_2^2 + U_2^2}{\sigma_H^2} G_{C_\infty}(\omega); \\ W_{C_{\xi_{12}}}(\omega) = \frac{z_\xi A_2^2}{\sigma_H^2} G_{C_\infty}(\omega). \end{array} \right. \quad (3.1.10)$$

Для одномерной двухточечной частично когерентной модели корреляционные функции рассчитываются на основании соответствующих функций, известных для одномерной трехточечной некогерентной модели, по выражениям (3.1.4) – (3.1.7) в общем случае и по выражениям (3.1.9) – (3.1.10) для распределенного объекта, обладающего свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты.

### 3.2. Определение спектрально-корреляционных характеристик для двумерных моделей

В предыдущем пункте была рассмотрена связь между соответственными АКФ и ВКФ квадратурных компонент сигналов, подводимых к точкам одномерной трехточечной некогерентной и одномерной двухточечной частично когерентной моделей. Теперь рассмотрим такую связь для двумерных моделей: пяти- и девятиточечной некогерентной и четырехточечной частично когерентной.

В разделе 2 и в [62,142–143] показано, что проекциями пяти- и девятиточечной некогерентной модели на оси координат являются одномерные трехточечные некогерентные модели. Проекциями искомой четырехточечной модели на оси координат являются одномерные двухточечные частично когерентные модели.

В пункте 3.1 был рассмотрен способ определения корреляционных функций для сигналов одномерной двухточечной частично когерентной модели на основе соответственных КФ для сигналов трехточечной некогерентной модели. Разовьем этот способ для применения к двумерным моделям, точки которых расположены вдоль двух ортогональных осей координат:  $OX$  и  $OY$ .

Пятиточечная некогерентная модель состоит из пяти точек, излучающих некоррелированные нормальные случайные процессы  $u_i(t)$  со среднеквадратическим отклонением (СКО)  $U_i$ , где  $i$  – номер излучателя модели. Положение точек с указанием их координат показано белыми маркерами-кружками на рис. 2.2.3-а). АКФ и ВКФ квадратурных компонент излучаемых случайных процессов:  $R_i(\tau)$  и  $S_i(\tau)$  соответственно.

Спроецируем точки пятиточечной некогерентной модели на обобщенные угловые оси координат  $OX$  и  $OY$  (рис. 2.2.3-а)). Как и для точек исходной модели, сигналы, излучаемые из точек проекций, являются некоррелированными нормальными случайными процессами. СКО этих сигналов:  $U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3}$  и  $U_{y_1}, U_{y_2}, U_{y_3}$ .

Выражения для СКО сигналов, излучаемых моделями-проекциями, были определены в разделе 2. Получим выражения, соответствующие корреляционным функциям этих сигналов.

Корреляционные функции сигналов, излучаемых моделями-проекциями приведены в системе (3.2.1):

$$\begin{cases} R_{x_1}(\tau) = R_1(\tau) + R_3(\tau); \\ R_{x_2}(\tau) = R_2(\tau) + R_4(\tau); \\ R_{x_3}(\tau) = R_{y_3}(\tau) = R_5(\tau); \\ R_{y_1}(\tau) = R_3(\tau) + R_4(\tau); \\ R_{y_2}(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau); \end{cases} \begin{cases} S_{x_1}(\tau) = S_1(\tau) + S_3(\tau); \\ S_{x_2}(\tau) = S_2(\tau) + S_4(\tau); \\ S_{x_3}(\tau) = S_{y_3}(\tau) = S_5(\tau); \\ S_{y_1}(\tau) = S_3(\tau) + S_4(\tau); \\ S_{y_2}(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau). \end{cases} \quad (3.2.1)$$

Пятый излучатель проецируется в две точки с координатами  $(\Delta x; 0)$  и  $(0; \Delta y)$ . Им соответствует тот же сигнал с тем же СКО, что и самому пятому излучателю:

$$U_5 u_5(t) = U_{x_3} u_5(t) = U_{y_3} u_5(t),$$

где номер 3 выбран для упрощения рассмотрения трехточечных моделей-проекций. Очевидно, что:  $U_5 = U_{x_3} = U_{y_3}$ .

Таким образом, получены две трехточечные неэквидистантные некогерентные модели, представляющие собой проекции исходной пятиточечной модели на оси координат.

Рассмотрим четырехточечную частично когерентную модель, эквивалентную представленной выше пятиточечной некогерентной.

Пусть имеется четыре излучателя нормальных коррелированных случайных процессов  $s_k(t)$  с СКО  $\sigma_k$ , где  $k$  – номер излучателя модели. Координаты излучателей определяются их расположением относительно двух угловых осей координат:  $OX$  и  $OY$ . Для упрощения, положим, что все точки располагаются в вершинах прямоугольника или в частном случае квадрата с нормированной длиной стороны равной 2 так, как показано на рис. 2.2.2. АКФ и ВКФ квадратурных компонент излучаемых случайных процессов:  $B_k(\tau)$  и  $S_k(\tau)$  соответственно.

Проекциями двумерной четырехточечной модели на оси координат являются двухточечные частично когерентные модели с СКО сигналов  $\sigma_{x_1}$ ,  $\sigma_{x_2}$ ,  $\sigma_{y_1}$  и  $\sigma_{y_2}$

Корреляционные функции сигналов, излучаемых моделями-проекциями приведены в системе (3.2.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{x_1}(\tau) = B_1(\tau) + B_3(\tau) + 2B_{13}(\tau); \\ B_{x_2}(\tau) = B_2(\tau) + B_4(\tau) + 2B_{24}(\tau); \\ B_{x_{12}}(\tau) = B_{12}(\tau) = B_{34}(\tau); \\ B_{y_1}(\tau) = B_3(\tau) + B_4(\tau) + 2B_{34}(\tau); \\ B_{y_2}(\tau) = B_1(\tau) + B_2(\tau) + 2B_{12}(\tau); \\ B_{y_{12}}(\tau) = B_{13}(\tau) = B_{24}(\tau); \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} S_{x_1}(\tau) = S_1(\tau) + S_3(\tau) + 2S_{13}(\tau); \\ S_{x_2}(\tau) = S_2(\tau) + S_4(\tau) + 2S_{24}(\tau); \\ S_{x_{12}}(\tau) = S_{12}(\tau) = S_{34}(\tau); \\ S_{y_1}(\tau) = S_3(\tau) + S_4(\tau) + 2S_{34}(\tau); \\ S_{y_2}(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau) + 2S_{12}(\tau); \\ S_{y_{12}}(\tau) = S_{13}(\tau) = S_{24}(\tau), \end{array} \right. \quad (3.2.2)$$

где  $B_{12}(\tau)$ ,  $B_{34}(\tau)$ ,  $B_{14}(\tau)$ ,  $B_{24}(\tau)$  и  $S_{12}(\tau)$ ,  $S_{34}(\tau)$ ,  $S_{14}(\tau)$ ,  $S_{24}(\tau)$  – взаимные корреляционные функции сигналов соответственных излучателей.

Таким образом, получены две двухточечные частично когерентные модели, представляющие собой проекции искомой четырехточечной модели на оси координат.

СКО двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной связаны выражениями (2.2.8) и (3.2.1), которые применительно к рассматриваемой задаче имеют вид

$$\begin{cases} \sigma_{x_1} = \sqrt{A_{x_1}^2 + U_{x_1}^2}; \\ \sigma_{x_2} = \sqrt{A_{x_2}^2 + U_{x_2}^2}; \\ \sigma_{y_1} = \sqrt{A_{y_1}^2 + U_{y_1}^2}; \\ \sigma_{y_2} = \sqrt{A_{y_2}^2 + U_{y_2}^2}, \end{cases} \quad (3.2.3)$$

где параметры  $A_{x_1}$ ,  $A_{x_2}$ ,  $A_{y_1}$ ,  $A_{y_2}$  - СКО составляющих сигналов соответствующих точек частично когерентных моделей, получающиеся при разложении, описанном в выражении (3.1.2).

АКФ двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной связаны выражениями (3.1.4), которые для рассматриваемой задачи принимают вид

$$\begin{cases} B_{x_1}(\tau) = R_{x_1}(\tau) + z_x B_{x_{12}}(\tau); \\ B_{x_2}(\tau) = R_{x_2}(\tau) + \frac{B_{x_{12}}(\tau)}{z_x}; \\ B_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_{x_3}^2} R_{x_3}(\tau); \\ B_{y_1}(\tau) = R_{y_1}(\tau) + z_y B_{y_{12}}(\tau); \\ B_{y_2}(\tau) = R_{y_2}(\tau) + \frac{B_{y_{12}}(\tau)}{z_y}; \\ B_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_{y_3}^2} R_{y_3}(\tau), \end{cases} \quad (3.2.4)$$

где значения параметров  $z_x$  и  $z_y$  определяются положением  $\Delta x$  и  $\Delta y$  проекций пятого излучателя двумерной некогерентной модели:

$$\begin{cases} z_x = \frac{1 - \Delta x}{1 + \Delta x}; \\ z_y = \frac{1 - \Delta y}{1 + \Delta y}. \end{cases} \quad (3.2.5)$$

Кроме того, параметры  $z_x$  и  $z_y$  связаны с СКО проекций пятого излучателя двумерной некогерентной модели:

$$\begin{cases} A_{x_1} = z_x A_{x_2}; \\ A_{x_2} = \frac{U_{x_3}}{1 + z_x}; \\ A_{y_2} = z_y A_{y_2}; \\ A_{y_2} = \frac{U_{y_3}}{1 + z_y}. \end{cases} \quad (3.2.6)$$

Раскроем выражения (3.2.4), подставив в них (3.2.1) и (3.2.2).

$$\begin{cases} B_{x_1}(\tau) = R_1(\tau) + R_3(\tau) + z_x B_{x_{12}}(\tau); \\ B_{x_2}(\tau) = R_2(\tau) + R_4(\tau) + \frac{B_{x_{12}}(\tau)}{z_x}; \\ B_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau); \\ B_{y_1}(\tau) = R_3(\tau) + R_4(\tau) + z_y B_{y_{12}}(\tau); \\ B_{y_2}(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau) + \frac{B_{y_{12}}(\tau)}{z_y}; \\ B_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau). \end{cases} \quad (3.2.7)$$

Выражения в системе (3.2.7) описывают АКФ квадратурных компонент сигналов, подводимых к точкам проекций искомой четырехточечной частично когерентной модели на оси координат. Определим выражения для КФ сигналов искомой четырехточечной модели на основе КФ для ее моделей-проекций.

Подставим выражения (3.2.7) в систему (3.2.4).

$$\left\{ \begin{array}{l}
R_1(\tau) + R_3(\tau) + z_x B_{x_{12}}(\tau) = B_1(\tau) + B_3(\tau) + 2B_{y_{12}}(\tau); \\
R_2(\tau) + R_4(\tau) + \frac{B_{x_{12}}(\tau)}{z_x} = B_2(\tau) + B_4(\tau) + 2B_{y_{12}}(\tau); \\
B_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau); \\
R_3(\tau) + R_4(\tau) + z_y B_{y_{12}}(\tau) = B_3(\tau) + B_4(\tau) + 2B_{x_{12}}(\tau); \\
R_1(\tau) + R_2(\tau) + \frac{B_{y_{12}}(\tau)}{z_y} = B_1(\tau) + B_2(\tau) + 2B_{x_{12}}(\tau); \\
B_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau);
\end{array} \right. \quad (3.2.8)$$

Система (3.2.8), связывающая корреляционные функции двух частично когерентных моделей-проекций и искомой четырехточечной частично когерентной модели, переопределена. Для ее однозначного решения необходимо задания одной из искомых корреляционных функций (например,  $B_1(\tau) = fun_B(\tau)$  и  $C_1(\tau) = fun_C(\tau)$ ). Например, эти корреляционные функции могут совпадать с корреляционными функциями одноименных и разноименных квадратурных компонент суммарного сигнала, отраженного от замещаемого объекта. Тогда решение системы (3.2.8) принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l}
B_1(\tau) = fun_B(\tau); \\
B_2(\tau) = B_{y_2}(\tau) - B_1(\tau) - 2B_{x_{12}}(\tau); \\
B_3(\tau) = B_{x_1}(\tau) - B_1(\tau) - 2B_{y_{12}}(\tau); \\
B_4(\tau) = B_{y_1}(\tau) - B_3(\tau) - 2B_{x_{12}}(\tau); \\
B_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau); \\
B_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau).
\end{array} \right. \quad (3.2.9)$$

Раскроем выражения (3.2.9), подставив в них (3.2.7).



$$\left\{ \begin{array}{l} B_1(\tau) = fun_B(\tau); \\ B_2(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau) + \frac{B_{y_{12}}(\tau)}{z_y} - 2B_{x_{12}}(\tau) - B_1(\tau); \\ B_3(\tau) = R_1(\tau) + R_3(\tau) + z_x B_{x_{12}}(\tau) - 2B_{y_{12}}(\tau) - B_1(\tau); \\ B_4(\tau) = R_3(\tau) + R_4(\tau) + z_y B_{y_{12}}(\tau) - 2B_{x_{12}}(\tau) - B_3(\tau); \\ B_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau); \\ B_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_5^2} R_5(\tau). \end{array} \right. \quad (3.2.10)$$

Выражения (3.2.10) описывают АКФ квадратурных компонент сигналов искомой четырехточечной частично когерентной модели.

Аналогичным образом определяются выражения для взаимных корреляционных функций квадратурных компонент сигналов искомой частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1(\tau) = fun_C(\tau); \\ C_2(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau) + \frac{C_{y_{12}}(\tau)}{z_y} - 2C_{x_{12}}(\tau) - C_1(\tau); \\ C_3(\tau) = S_1(\tau) + S_3(\tau) + z_x C_{x_{12}}(\tau) - 2C_{y_{12}}(\tau) - C_1(\tau); \\ C_4(\tau) = S_3(\tau) + S_4(\tau) + z_y C_{y_{12}}(\tau) - 2C_{x_{12}}(\tau) - C_3(\tau); \\ C_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_5^2} S_5(\tau); \\ C_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_5^2} S_5(\tau). \end{array} \right. \quad (3.2.11)$$

Задание произвольной корреляционной функции  $B_k(\tau)$  и  $C_k(\tau)$  подразумевает обязательное выполнение условий физической реализуемости коэффициентов авто- и взаимной корреляции квадратурных компонент сигнала, излучаемого из  $k$ -той точки искомой частично когерентной модели. Эти условия можно записать в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \frac{\sqrt{B_k(\tau) + C_k(\tau)}}{\sigma_k} \leq 1; \\ B_k(0) = \sigma_k^2; \\ C_k(0) = 0; \\ |B_k(\tau)| \leq \sigma_k^2; \\ |C_k(\tau)| \leq \sigma_k^2; \\ \sigma_k \geq 0. \end{array} \right. \quad (3.2.12)$$

Запишем выражения для СПМ, соответствующих корреляционным функциям  $B_k(\tau)$  в системе (3.2.10).

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{B_1}(\omega) = fun_{W_B}(\omega); \\ W_{B_2}(\omega) = G_{R_1}(\omega) + G_{R_2}(\omega) + \frac{W_{B_{y12}}(\omega)}{z_y} - 2W_{B_{x12}}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\ W_{B_3}(\omega) = G_{R_1}(\omega) + G_{R_3}(\omega) + z_x W_{B_{x12}}(\omega) - 2W_{B_{y12}}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\ W_{B_4}(\omega) = G_{R_3}(\omega) + G_{R_4}(\omega) + z_y W_{B_{y12}}(\omega) - 2W_{B_{x12}}(\omega) - W_{B_3}(\omega); \\ W_{B_{x12}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_5^2} G_{R_5}(\omega); \\ W_{B_{y12}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_5^2} G_{R_5}(\omega). \end{array} \right. \quad (3.2.13)$$

СПМ, соответствующие корреляционным функциям  $C_k(\tau)$  в системе (3.2.11):

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{C_1}(\omega) = fun_{W_C}(\omega); \\ W_{C_2}(\omega) = G_{S_1}(\omega) + G_{S_2}(\omega) + \frac{W_{C_{y12}}(\omega)}{z_y} - 2W_{C_{x12}}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\ W_{C_3}(\omega) = G_{S_1}(\omega) + G_{S_3}(\omega) + z_x W_{C_{x12}}(\omega) - 2W_{C_{y12}}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\ W_{C_4}(\omega) = G_{S_3}(\omega) + G_{S_4}(\omega) + z_y W_{C_{y12}}(\omega) - 2W_{C_{x12}}(\omega) - W_{C_3}(\omega); \\ W_{C_{x12}}(\omega) = \frac{z_x A_{x2}^2}{U_5^2} G_{S_5}(\omega); \\ W_{C_{y12}}(\omega) = \frac{z_y A_{y2}^2}{U_5^2} G_{S_5}(\omega). \end{array} \right. \quad (3.2.14)$$

Рассмотрим частный случай. Если замещаемый распределенный объект обладает свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты, то КФ сигналов некогерентной модели имеют одинаковую форму. Эта форма соответствует форме КФ суммы сигналов в точке приема  $R_\infty(\tau) = \sum_i R_i(\tau)$ . Уровень КФ при этом определяется мощностью этих сигналов

относительно  $\sigma_H^2$  как  $\frac{U_i^2}{\sigma_H^2}$ , где  $\sigma_H^2 = \sum_i U_i^2$  - мощность суммы сигналов в точке приема.

Для объекта с делимостью пространственной и временной (частотной) координат выражения (3.2.10) и (3.2.11) принимают вид

$$\left\{ \begin{array}{l}
B_1(\tau) = fun_B(R_\infty(\tau)); \\
B_2(\tau) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - B_1(\tau); \\
B_3(\tau) = \frac{U_1^2 + U_3^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - B_1(\tau); \\
B_4(\tau) = \frac{U_3^2 + U_4^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - B_3(\tau); \\
B_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \\
B_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau);
\end{array} \right. \quad (3.2.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
C_1(\tau) = fun_B(S_\infty(\tau)); \\
C_2(\tau) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau) - C_1(\tau); \\
C_3(\tau) = \frac{U_1^2 + U_3^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau) - C_1(\tau); \\
C_4(\tau) = \frac{U_3^2 + U_4^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau) - C_3(\tau); \\
C_{x_{12}}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau); \\
C_{y_{12}}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau).
\end{array} \right. \quad (3.2.16)$$

Выражения для СПМ, соответствующих приведенным выше КФ, принимают вид

$$\left\{ \begin{array}{l}
W_{B_1}(\omega) = \text{fun}_B(G_{R_\infty}(\omega)); \\
W_{B_2}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\
W_{B_3}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_3^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\
W_{B_4}(\omega) = \frac{U_3^2 + U_4^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega) - W_{B_3}(\omega); \\
W_{B_{x_{12}}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega); \\
W_{B_{y_{12}}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega).
\end{array} \right. \quad (3.2.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
W_{C_1}(\omega) = \text{fun}_B(G_{S_\infty}(\omega)); \\
W_{C_2}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\
W_{C_3}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_3^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\
W_{C_4}(\omega) = \frac{U_3^2 + U_4^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega) - W_{C_3}(\omega); \\
W_{C_{x_{12}}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega); \\
W_{C_{y_{12}}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega).
\end{array} \right. \quad (3.2.18)$$

Выражения (3.2.10) – (3.2.14) позволяют рассчитать корреляционные функции и соответствующие им спектральные плотности мощности сигналов искомой двумерной четырехточечной частично когерентной модели на основе заданных соответственных корреляционных функций и спектральных плотностей мощности сигналов исходной двумерной пятиточечной некогерентной модели.

Для объекта, обладающего свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты выражения для соответствующих КФ и СПМ приведены в системах (3.2.15) – (3.2.18).

Аналогичным образом определяются КФ квадратурных компонент сигналов искомой четырехточечной частично когерентной модели на основе соответственных функций для девятиточечной некогерентной модели.

Получим эти выражения с сохранением обозначений параметров, соответствующих исходной некогерентной модели.

Пусть имеется девять излучателей нормальных некоррелированных случайных процессов  $u_i(t)$  с СКО  $U_i$ , где  $i$  – номер излучателя модели. Координаты излучателей определяются их расположением относительно двух угловых осей координат:  $OX$  и  $OY$ . Излучатели располагаются так, как показано на рис. 2.2.3-б) и пронумерованы слева-направо сверху-вниз. АКФ и ВКФ квадратурных компонент излучаемых случайных процессов:  $R_i(\tau)$  и  $S_i(\tau)$  соответственно.

Спроецируем точки девятиточечной некогерентной модели обобщенные угловые оси координат  $OX$  и  $OY$  (рис. 2.2.3-б)). Как и для точек исходной модели, сигналы, излучаемые из точек проекций, являются некоррелированными нормальными случайными процессами. СКО этих сигналов:  $U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3}$  и  $U_{y_1}, U_{y_2}, U_{y_3}$ .

Выражения для определения СКО сигналов, излучаемых моделями-проекциями приведены в разделе 2. Получим выражения, соответствующие корреляционным функциям этих сигналов.

Корреляционные функции сигналов, излучаемых моделями-проекциями приведены в системе (3.2.22):

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{x_1}(\tau) = R_1(\tau) + R_4(\tau) + R_7(\tau); \\ R_{x_2}(\tau) = R_3(\tau) + R_6(\tau) + R_9(\tau); \\ R_{x_3}(\tau) = R_2(\tau) + R_5(\tau) + R_8(\tau); \\ R_{y_1}(\tau) = R_7(\tau) + R_8(\tau) + R_9(\tau); \\ R_{y_2}(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau) + R_3(\tau); \\ R_{y_3}(\tau) = R_4(\tau) + R_5(\tau) + R_6(\tau); \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} S_{x_1}(\tau) = S_1(\tau) + S_4(\tau) + S_7(\tau); \\ S_{x_2}(\tau) = S_3(\tau) + S_6(\tau) + S_9(\tau); \\ S_{x_3}(\tau) = S_2(\tau) + S_5(\tau) + S_8(\tau); \\ S_{y_1}(\tau) = S_7(\tau) + S_8(\tau) + S_9(\tau); \\ S_{y_2}(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau) + S_3(\tau); \\ S_{y_3}(\tau) = S_4(\tau) + S_5(\tau) + S_6(\tau); \end{array} \right. \quad (3.2.19)$$

Получим выражения для КФ сигналов искомой частично когерентной модели, подставив выражения левую систему из (3.2.19) в (3.2.4) и решив систему относительно  $B_k(\tau)$ .

Выражения для АКФ квадратурных компонент сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_1(\tau) = fun_B(\tau); \\ B_2(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau) + R_3(\tau) + \frac{B_{y12}(\tau)}{z_y} - 2B_{x12}(\tau) - R_1(\tau); \\ B_3(\tau) = R_1(\tau) + R_4(\tau) + R_7(\tau) + z_x B_{x12}(\tau) - 2B_{y12}(\tau) - R_1(\tau); \\ B_4(\tau) = R_7(\tau) + R_8(\tau) + R_9(\tau) + z_y B_{y12}(\tau) - 2B_{x12}(\tau) - R_3(\tau); \\ B_{x12}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_2^2 + U_5^2 + U_8^2} (R_2(\tau) + R_5(\tau) + R_8(\tau)); \\ B_{y12}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_4^2 + U_5^2 + U_6^2} (R_4(\tau) + R_5(\tau) + R_6(\tau)). \end{array} \right. \quad (3.2.20)$$

Выражения для ВКФ квадратурных компонент сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1(\tau) = fun_C(\tau); \\ C_2(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau) + S_3(\tau) + \frac{C_{y12}(\tau)}{z_y} - 2C_{x12}(\tau) - S_1(\tau); \\ C_3(\tau) = S_1(\tau) + S_4(\tau) + S_7(\tau) + z_x C_{x12}(\tau) - 2C_{y12}(\tau) - S_1(\tau); \\ C_4(\tau) = S_7(\tau) + S_8(\tau) + S_9(\tau) + z_y C_{y12}(\tau) - 2C_{x12}(\tau) - S_3(\tau); \\ C_{x12}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_2^2 + U_5^2 + U_8^2} (S_2(\tau) + S_5(\tau) + S_8(\tau)); \\ C_{y12}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_4^2 + U_5^2 + U_6^2} (S_4(\tau) + S_5(\tau) + S_6(\tau)). \end{array} \right. \quad (3.2.21)$$

Выражения для СПМ, соответствующих КФ одноименных квадратур сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{B_1}(\omega) = fun_{W_B}(\omega); \\ W_{B_2}(\omega) = G_{R_1}(\omega) + G_{R_2}(\omega) + G_{R_3}(\omega) + \frac{W_{B_{y12}}(\omega)}{z_y} - 2W_{B_{x12}}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\ W_{B_3}(\omega) = G_{R_1}(\omega) + G_{R_4}(\omega) + G_{R_7}(\omega) + z_x W_{B_{x12}}(\omega) - 2W_{B_{y12}}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\ W_{B_4}(\omega) = G_{R_7}(\omega) + G_{R_8}(\omega) + G_{R_9}(\omega) + z_y W_{B_{y12}}(\omega) - 2W_{B_{x12}}(\omega) - W_{B_3}(\omega); \\ W_{B_{x12}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_2^2 + U_5^2 + U_8^2} (G_{R_2}(\omega) + G_{R_5}(\omega) + G_{R_8}(\omega)); \\ W_{B_{y12}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_4^2 + U_5^2 + U_6^2} (G_{R_4}(\omega) + G_{R_5}(\omega) + G_{R_6}(\omega)). \end{array} \right. \quad (3.2.22)$$

Выражения для СПМ, соответствующих КФ разноименных квадратур сигналов частично когерентной модели:



$$\left\{ \begin{array}{l}
W_{C_1}(\omega) = fun_{W_C}(\omega); \\
W_{C_2}(\omega) = G_{S_1}(\omega) + G_{S_2}(\omega) + G_{S_3}(\omega) + \frac{W_{C_{y12}}(\omega)}{z_y} - 2W_{C_{x12}}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\
W_{C_3}(\omega) = G_{S_1}(\omega) + G_{S_4}(\omega) + G_{S_7}(\omega) + z_x W_{C_{x12}}(\omega) - 2W_{C_{y12}}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\
W_{C_4}(\omega) = G_{S_7}(\omega) + G_{S_8}(\omega) + G_{S_9}(\omega) + z_y W_{C_{y12}}(\omega) - 2W_{C_{x12}}(\omega) - W_{C_3}(\omega); \quad (3.2.23) \\
W_{C_{x12}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{U_2^2 + U_5^2 + U_8^2} (G_{S_2}(\omega) + G_{S_5}(\omega) + G_{S_8}(\omega)); \\
W_{C_{y12}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{U_4^2 + U_5^2 + U_6^2} (G_{S_4}(\omega) + G_{S_5}(\omega) + G_{S_6}(\omega)).
\end{array} \right.$$

Если замещаемый распределенный объект обладает свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты, то выражения для КФ и СПМ упрощаются.

Выражения для КФ одноименных квадратур сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l}
B_1(\tau) = fun_B(R_\infty(\tau)); \\
B_2(\tau) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - R_1(\tau); \\
B_3(\tau) = \frac{U_1^2 + U_4^2 + U_7^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - R_1(\tau); \\
B_4(\tau) = \frac{U_7^2 + U_8^2 + U_9^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - R_3(\tau); \\
B_{x12}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau); \\
B_{y12}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau).
\end{array} \right. \quad (3.2.24)$$

Выражения для КФ разноименных квадратур сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l}
C_1(\tau) = \text{fun}_C(R_\infty(\tau)); \\
C_2(\tau) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau) - C_1(\tau); \\
C_3(\tau) = \frac{U_1^2 + U_4^2 + U_7^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} R_\infty(\tau) - C_1(\tau); \\
C_4(\tau) = \frac{U_7^2 + U_8^2 + U_9^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau) - C_3(\tau); \\
C_{x12}(\tau) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau); \\
C_{y12}(\tau) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} S_\infty(\tau).
\end{array} \right. \quad (3.2.25)$$

Выражения для СПМ, соответствующих КФ одноименных квадратур сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l}
W_{B_1}(\omega) = \text{fun}_B(G_{R_\infty}(\omega)); \\
W_{B_2}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\
W_{B_3}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_4^2 + U_7^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega) - W_{B_1}(\omega); \\
W_{B_4}(\omega) = \frac{U_7^2 + U_8^2 + U_9^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega) - W_{B_3}(\omega); \\
W_{B_{x12}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega); \\
W_{B_{y12}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{R_\infty}(\omega).
\end{array} \right. \quad (3.2.26)$$

Выражения для СПМ, соответствующих КФ разноименных квадратур сигналов частично когерентной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{C_1}(\omega) = fun_B(G_{S_\infty}(\omega)); \\ W_{C_2}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + A_{y_2}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\ W_{C_3}(\omega) = \frac{U_1^2 + U_4^2 + U_7^2 + A_{x_1}^2 - 2z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega) - W_{C_1}(\omega); \\ W_{C_4}(\omega) = \frac{U_7^2 + U_8^2 + U_9^2 + A_{y_1}^2 - 2z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega) - W_{C_3}(\omega); \\ W_{C_{x_{12}}}(\omega) = \frac{z_x A_{x_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega); \\ W_{C_{y_{12}}}(\omega) = \frac{z_y A_{y_2}^2}{\sigma_H^2} G_{S_\infty}(\omega). \end{array} \right. \quad (3.2.27)$$

Выражения (3.2.20) – (3.2.23) позволяют рассчитать корреляционные функции и соответствующие им спектральные плотности мощности сигналов искомой двумерной четырехточечной частично когерентной модели на основе заданных соответственных корреляционных функций и спектральных плотностей мощности сигналов исходной двумерной девятиточечной некогерентной модели.

Для объекта, обладающего свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты, выражения для соответственных КФ и СПМ приведены в системах (3.2.24) – (3.2.27).

Запишем алгоритм расчета корреляционных функций или СПМ квадратур сигналов, подводимых к точкам двумерной частично когерентной модели:

1) На основе известных корреляционных функций исходной двумерной пяти- или девятиточечной некогерентной модели осуществляется переход по выражениям (3.2.4) или (3.2.19) соответственно к ее проекциям на оси координат. Проекция является трехточечными некогерентными моделями.

2) Для каждой трехточечной модели-проекция на оси координат по выражениям (3.2.7) осуществляется переход к двухточечным частично когерентным моделям, которые являются проекциями искомой двумерной четырехточечной частично когерентной модели на те же оси координат.

3) От двухточечных частично когерентных моделей-проекции осуществляется переход к искомой двумерной четырехточечной частично когерентной модели по выражениям (3.2.10) – (3.2.14) или (3.2.20) – (3.2.23).

### 3.3. Программное моделирование

На основе полученных теоретических результатов проведено программное моделирование. Моделировался прием сигналов двумерной пятиточечной, двумерной девятиточечной некогерентной модели и двумерной четырехточечной частично когерентной, расположенных вдоль обобщенных осей координат  $OX$  и  $OY$ . Излучатели моделей расположены так, как показано на рис. 2.2.2 и 2.3.3(а)-(б), в диапазоне значений обобщенных угловых координат  $x \in [-1;1]$  и  $y \in [-1;1]$ . Заданные параметры ПРВ:  $m_x = 0.5$ ,  $\mu_x = 5$ ,  $m_y = -0.2$ ,  $\mu_y = 3$ . Количество отсчетов в реализациях сигналов равно 30000. Относительная полоса частот, занимаемая сигналами равна 4%. Результатом моделирования является сравнение АКФ пеленга для рассматриваемых моделей, оцененных методом моноимпульсной пеленгации, подробно описанным в [39,151,153], а также СКО сигналов, подводимых к точкам моделей, и полученные в результате моделирования параметры ПРВ. Усреднение ПРВ проводилось по 20 реализациям. Сходимость зависимостей АКФ проверялась по критерию  $\chi^2$ -Пирсона с поправкой Йейтса при допустимом уровне ложной тревоги 0.05 как для оси  $OX$ , так и для оси  $OY$ .

Результаты моделирования для пятиточечной некогерентной и четырехточечной частично когерентной модели приведены в таблицах 3.3.1 – 3.3.3 и на рис. 3.3.1.

В таблицах 3.3.1 и 3.3.2 приведены значения СКО сигналов, подводимых к точкам моделей. Эти значения рассчитаны на основе заданных параметров ПРВ угловых шумов и параметров  $\Delta x = 0.447$  и  $\Delta y = -0.209$ , что удовлетворяет условиям эквивалентности рассматриваемых моделей, приведенным в выражениях (2.1.4). В таблице 3.3.3 приведены полученные в результате

моделирования параметры ПРВ для осей  $OX$  и  $OY$ . На рис. 3.3.1 приведено сравнение полученных в результате моделирования АКФ пеленга для рассматриваемых моделей. Допустимое значение критерия согласия Пирсона для АКФ как по оси  $OX$ , так и по оси  $OY$  равно  $\chi^2 = 88.2502$  в пределах  $\pm 20$  отсчетов от максимума. Рассчитанное значение для оси  $OX$  составило 10.2882, для оси  $OY$ : 8.1309.

*Таблица 3.3.1 – СКО сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели*

Номер точки модели	СКО, отн. ед.
1	0.1084
2	0.6901
3	0.1878
4	0.7757
5	2.9791

*Таблица 3.3.2 – СКО сигналов, подводимых к точкам искомой частично когерентной модели*

Номер точки модели	1	2	3	4
СКО, отн. ед.	0.369	1.0368	0.5302	1.49

*Таблица 3.3.3 – Параметры смоделированных ПРВ угловых шумов*

Некогерентная модель		Частично когерентная модель	
$m_x$	0.5009	$m_x$	0.4995
$\mu_x$	4.9655	$\mu_x$	5.0358
$m_y$	-0.2008	$m_y$	-0.1996
$\mu_y$	3.0442	$\mu_y$	3.0482

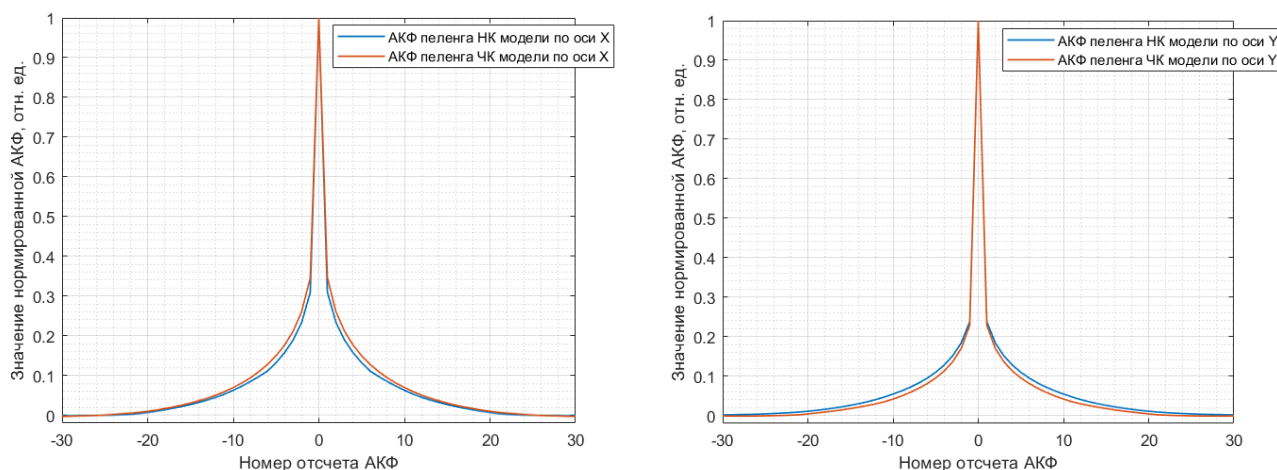


Рисунок 3.3.1 – Сравнение АКФ пеленга двумерной четырехточечной частично когерентной модели и пятиточечной некогерентной для осей  $OX$  и  $OY$  соответственно

Результаты моделирования для девятиточечной некогерентной и четырехточечной частично когерентной модели приведены в таблицах 3.3.4 – 3.3.6 и на рис. 3.3.2.

В таблицах 3.3.4 и 3.3.5 приведены значения СКО сигналов, подводимых к точкам моделей, рассчитанные на основе заданных параметров ПРВ угловых шумов и параметров  $\Delta x = m_x = 0.5$  и  $\Delta y = m_y = -0.2$ . В таблице 3.3.6 приведены полученные в результате моделирования параметры ПРВ для осей  $OX$  и  $OY$ . На рис. 3.3.2 приведено сравнение полученных в результате моделирования АКФ пеленга для рассматриваемых моделей. Допустимое значение критерия согласия Пирсона для АКФ как по оси  $OX$ , так и по оси  $OY$  равно  $\chi^2 = 72.1532$  в пределах  $\pm 20$  отсчетов от максимума. Рассчитанное значение для оси  $OX$  составило 22.8669, для оси  $OY$ : 5.3079.

Полученные в результате моделирования параметры ПРВ и зависимости АКФ пеленга совпадают с большой точностью: рассчитанное по результатам моделирования значение критерия хи-квадрат Пирсона с поправкой Йейтса меньше, чем его допустимое значение. Это подтверждает адекватность проверяемых теоретических результатов.

Таблица 3.3.4 – СКО сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели

Номер точки модели	СКО, отн. ед.
1	0.216
2	0.6421
3	0.0632
4	0.2921
5	2.9157
6	0.506
7	0.0365
8	0.7437
9	0.3742

Таблица 3.3.5 – СКО сигналов, подводимых к точкам искомой частично когерентной модели

Номер точки модели	1	2	3	4
СКО, отн. ед.	0.369	1.0368	0.5302	1.49

Таблица 3.3.6 – Параметры смоделированных ПРВ угловых шумов

Некогерентная модель		Частично когерентная модель	
$m_x$	0.4987	$m_x$	0.5003
$\mu_x$	4.9918	$\mu_x$	5.0448
$m_y$	-0.201	$m_y$	-0.1973
$\mu_y$	3.0086	$\mu_y$	3.0572

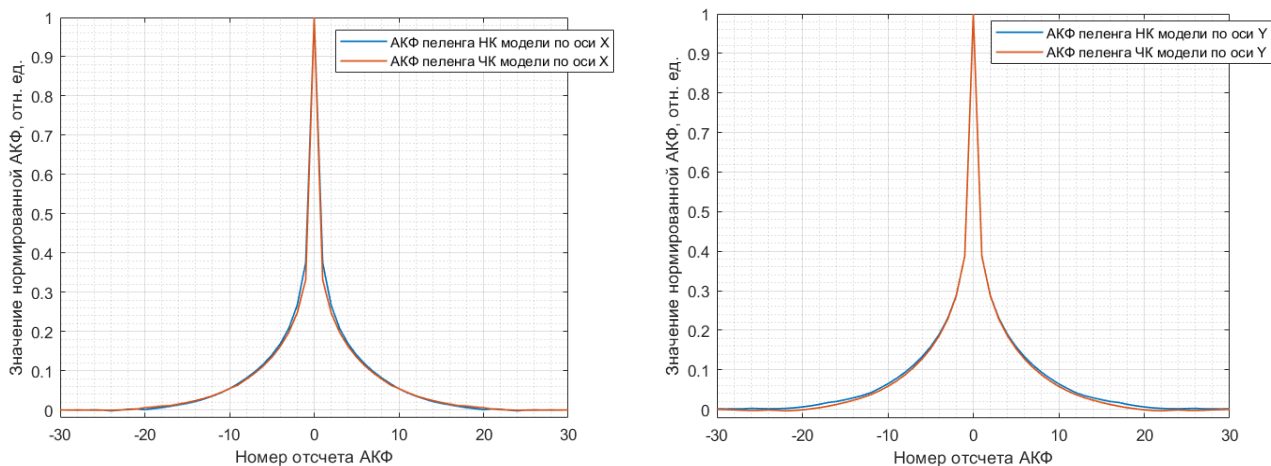


Рисунок 3.3.2 – Сравнение АКФ пеленга двумерной четырехточечной частично когерентной модели и девятиточечной некогерентной для осей  $OX$  и  $OY$

### 3.4. Заключение по третьему разделу

В разделе доказана эквивалентность двумерной четырехточечной частично когерентной модели и двумерной пяти- и девятиточечной некогерентных моделей с точки зрения обеспечения ими спектрально-корреляционных характеристик угловых шумов.

Получены выражения, позволяющие рассчитать для одномерной двухточечной частично когерентной модели корреляционные функции и соответствующие им спектральные плотности мощности квадратур излучаемых сигналов на основании соответствующих функций, известных для одномерной трехточечной некогерентной модели, по выражениям (3.1.4) – (3.1.7) в общем случае и по выражениям (3.1.9) – (3.1.10) для распределенного объекта, обладающего свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты.

Получены выражения (3.2.10) – (3.2.14) и (3.2.20) – (3.2.23), позволяющие перейти от корреляционных функций и СПМ квадратур сигналов двумерной пяти- или девятиточечной модели соответственно к соответственным функциям для двумерной четырехточечной частично когерентной для объектов, не



обладающих свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты.

Получены выражения (3.2.15) – (3.2.18) и (3.2.24) – (3.2.27), позволяющие перейти от корреляционных функций и СПМ квадратур сигналов двумерной пяти- или девятиточечной модели соответственно к соответствующим функциям для двумерной четырехточечной частично когерентной для объектов, обладающих свойством делимости пространственной и временной (частотной) координаты.

Полученные в разделе теоретические результаты проверены программным моделированием. Проверка заключалась в оценке сходимости зависимостей АКФ угловых шумов, формируемых двумерной пятиточечной некогерентной, двумерной девятиточечной некогерентной и четырехточечной частично когерентной моделями. Сходимость зависимостей подтверждена по критерию согласия Пирсона с поправкой Йейтса.

#### 4. Практическое применение полученных результатов и их экспериментальная апробация

В предыдущих разделах рассмотрено теоретическое обоснование метода синтеза частично когерентных моделей распределенных объектов радиолокации на основе их известных малоточечных некогерентных моделей. Рассмотрим его практическое применение на примере моделирования угловых шумов от метеообразований.

Синтезированная модель должна обеспечить формирование, в первую очередь традиционно имитируемых свойств метеообразования, таких как мощность эхо-сигнала, распределение его мгновенных значений, форму доплеровского спектра.

Во-вторых, в силу того, что метеообразование является объектом, распределенным по угловым координатам, необходимо формировать флуктуации фазового фронта отраженной электромагнитной волны – угловой шум с характеристиками (параметры плотности распределения вероятностей  $m$ ,  $\mu$  и форма корреляционной функции), соответствующими замещаемому объекту.

Метеообразования (МО) представляют собой источники пассивных помех, образованные такими явлениями как снег, дождь, грозовые облака, сдвиг ветра и др. МО являются неоднородностями на пути распространения электромагнитных волн. Такие неоднородности приводят к ослаблению, частотному и временному рассеянию излученного сигнала [38,161–167]. Спектральные свойства эхо-сигнала определяются распределением скоростей ветра в пределах метеообразования и его движением относительно РЛС [161–166].

Кроме того, метеообразование является объектом, распределенным по угловым координатам. Если в пределах элемента разрешения можно выделить несколько областей, формирующих независимые отражения, то сумма эхосигналов от такого объекта представляет собой нормальный случайный процесс [38,41,42,63]. То есть оценка положения центра излучения флуктуирует и может выходить за пределы элемента разрешения по угловым координатам. Это

может приводить к существенным ошибкам оценки угловых координат точечных целей, наблюдаемых на фоне метеообразования [42,161–166]. Таким образом, угловой шум метеообразований является значимым.

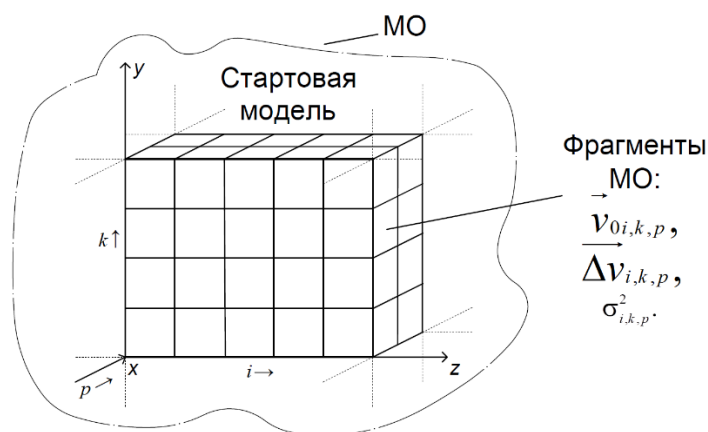


Рисунок 4.0.1 – Замещение метеообразования стартовой многоточечной моделью

Известны многоточечные геометрические модели, будем называть их стартовыми, которые позволяют с большой точностью замещать распределенные объекты радиолокации [38,41–42,61–65,98,116]. Объект представляется совокупностью парциальных объемов так, как показано на рис. 4.0.1. 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. Таким образом, стартовая модель представляет собой множество точечных излучателей электромагнитных волн, отраженных от фрагментов – парциальных объемов – распределенного объекта. Каждый парциальный объем является точкой стартовой модели. Фактически, подобное задание свойств объекта определяет функции  $F_r(x, y, z, \tau)$  и  $F_s(x, y, z, \tau)$  для многоточечной модели метеообразования [41,62–63].

Однако такие модели не пригодны на этапе полунатурного моделирования. Их использование требует сотен и даже тысяч излучающих антенн, расположенных в пределах элемента разрешения РЛС [18,99,117–123].

Известны малоточечные некогерентные модели, излучающие некоррелированные случайные процессы, достоверно замещающие

распределенный объект радиолокации и обеспечивающие независимое регулирование параметров ПРВ и спектрально-корреляционных характеристик угловых шумов вдоль двух ортогональных осей координат [41,62,63]. Такие модели содержат малое количество антенн (девять для замещения объекта, распределенного как по азимуту, так и по углу места) и применяются в матричных имитаторах радиосигналов, которые представляют собой жестко связанные системы излучателей, к которым подводятся сигналы с заданными характеристиками. Некогерентная модель синтезируется на основе стартовой с целью замещения области распределенного объекта, попадающей в элемент разрешения РЛС так, как показано штриховкой на рис. 4.0.2. Координаты внутренних (точки 2, 4, 5, 6, 8 на рис. 4.0.2) излучателей малоточечной модели и мощности всех излучаемых сигналов определяются требуемыми параметрами ПРВ угловых шумов фрагмента метеообразования, попавшего в пределы элемента разрешения [62,63]. Собственные спектрально-корреляционные свойства всех излученных сигналов определяются спектрально-корреляционными свойствами отражений от этих же фрагментов метеообразования [41–42,62–63].

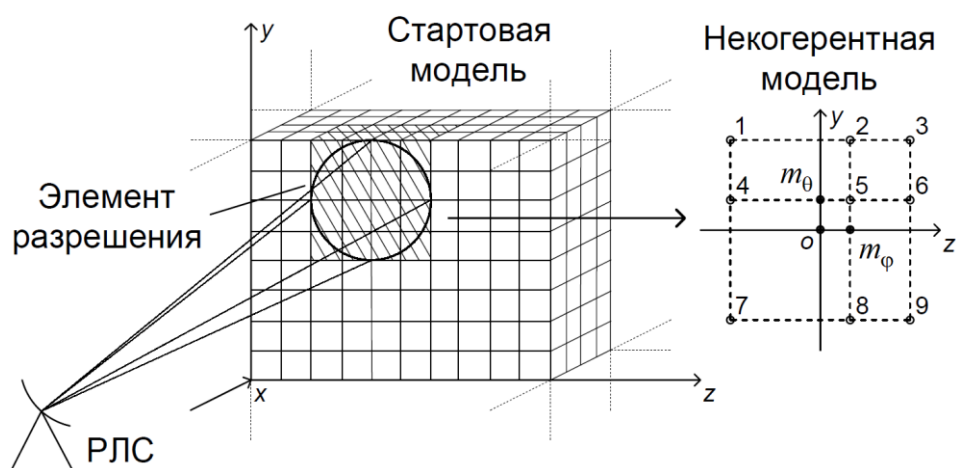


Рисунок 4.0.2 – Замещение элемента разрешения малоточечной некогерентной моделью

Т.к. одна малоточечная модель замещает только ту область объекта, которая попала в один элемент разрешения, то необходимо для каждого элемента

разрешения по дальности, находящегося на линии визирования РЛС, синтезировать собственную малоточечную модель.

Применение частично когерентных моделей вместо эквивалентных им некогерентных, как было показано в разделах 2 и 3, приведет к уменьшению количества антенн матричного имитатора (с девяти до четырех для объектов, распределенных как по азимуту, так и по углу места) и расширению возможностей по регулированию параметров и характеристик угловых шумов.

Цель раздела: развить полученные теоретические результаты до уровня их практического применения на примере синтеза частично когерентной четырехточечной модели метеообразования с учетом угловых шумов.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- Получены аналитические соотношения для определения мощностей сигналов, подводимых к излучателям многоточечной стартовой модели на основе дифференциальной отражательной способности фрагментов метеообразования;

- Получены соотношения, позволяющие определить параметры ПРВ угловых шумов области метеообразования, попавшей в элемент разрешения РЛС.

- Приведен алгоритм синтеза четырехточечной частично когерентной модели метеообразования на основе его известной девятиточечной некогерентной геометрической модели или многоточечной стартовой.

- Разработан программный макет для моделирования угловых шумов метеообразований.

#### **4.1. Алгоритм синтеза четырехточечной частично когерентной модели метеообразования**

Укрупненно, алгоритм замещения метеообразования частично когерентной моделью можно представить в следующем виде.

- 1) Синтезируется стартовая модель, замещающая распределенный объект множеством отражающих (излучающих) точек. Для каждой точки определяется мощность эхо-сигнала в точке приема (или отражательная

способность фрагмента), среднее значение вектора скорости ветра и вектор СКО разброса скоростей.

2) На основе стартовой многоточечной модели для каждого элемента разрешения по дальности с учетом направления визирования РЛС производится синтез девятиточечной некогерентной геометрической модели. Общее количество синтезированных малоточечных некогерентных моделей равно количеству элементов разрешения по дальности. Модели отличаются друг от друга расположением внутренних точек (точки 2, 4, 6, 8 на рис. 4.0.2), мощностями излучаемых сигналов, а также их спектральным составом. Напомним: так как модель некогерентная, коэффициент взаимной корреляции излучаемых сигналов равен нулю.

3) Для каждой из синтезированных некогерентных моделей по соотношениям, полученным в разделах 2 и 3, осуществляется переход к эквивалентной ей четырехточечной частично когерентной модели. Общее количество синтезированных малоточечных частично когерентных моделей равно количеству некогерентных.

а. Мощности и матрица коэффициентов взаимной корреляции сигналов, излучаемых частично когерентной моделью, определяются по выражениям (2.2.1) и (2.2.13) – (2.2.15).

б. Собственные спектрально-корреляционные свойства сигналов частично когерентной модели определяются по выражениям (3.2.20) – (3.2.23).

Результатом выполнения каждого из пунктов этого алгоритма являются параметры соответствующей модели (многоточечной стартовой, малоточечной некогерентной или малоточечной частично когерентной): количество точек и их расположение; мощности излучаемых сигналов; собственные спектрально-корреляционные свойства излучаемых сигналов; взаимные корреляционные функции излучаемых сигналов.

Стоит отметить, что при наличии ранее синтезированной стартовой или некогерентной модели объекта радиолокации соответствующий пункт алгоритма и все предыдущие пропускаются.

Рассмотрим этапы предложенного алгоритма подробнее.

## 4.2. Синтез стартовой модели

Первым пунктом алгоритма является синтез стартовой модели.

Метеообразование разбивается на фрагменты – парциальные объемы – так, как показано на рис. 4.0.1. Каждый объем замещается точкой многоточечной геометрической модели, излучающий сигнал, соответствующий отражениям от парциального объема. Излучатели многоточечной модели замещаемого метеообразования распределены с дискретным шагом по ортогональным осям  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  в декартовой системе координат (ДСК) относительно РЛС и имеют координаты  $(r_{СТi,k,p}; \theta_{СТi,k,p}; \varphi_{СТi,k,p})$  в сферической системе координат, где  $i$ ,  $k$  и  $p$  – номера точек по осям  $OZ$ ,  $OY$  и  $OX$  соответственно. Количество фрагментов по оси  $OZ$  равно  $K_i$ , по оси  $OY$  -  $K_k$ , а по оси  $OX$  -  $K_p$ . Пусть  $\vec{v}_0 = \{v_{0x}; v_{0y}; v_{0z}\}$  - вектор средней скорости движения фрагментов относительно земной поверхности за время наблюдения, СКО отклонения значений мгновенных скоростей от средних -  $\vec{\Delta v} = \{\Delta v_x; \Delta v_y; \Delta v_z\}$ . Значение мгновенной скорости движения фрагмента МО относительно земной поверхности  $\vec{v} = \{v_x; v_y; v_z\}$  является случайным и подчиняется закону нормального распределения с параметрами  $v_0$  и  $\Delta v^2$  для соответствующей оси координат.

Рассмотрим подробнее способы определения значений вектора средней скорости ветра  $\vec{v}_{0i,k,p}$ , вектора СКО разброса скоростей  $\vec{\Delta v}_{i,k,p}$  и мощностей эхосигналов от фрагментов объекта  $\sigma_{i,k,p}^2$ .

Спектр сигнала, отраженного от метеообразования, можно описать сверткой спектра зондирующего сигнала и доплеровского спектра помехи [38,42,56]. Доплеровский спектр помехи зависит от геометрических и отражательных свойств объекта радиолокации и геометрических параметров системы РЛС-цель.

Состав доплеровского спектра определяется радиальными проекциями  $v_{r_{i,k,p}}$  скоростей движения фрагментов МО относительно РЛС.

Для описания распределения скоростей ветра в метеообразованиях в настоящее время, применяют одну из трех моделей [42,56,162–163,168–169]: колоколообразная форма доплеровского спектра, метеорологическая модель турбулентности и модель сдвига ветра. Эти подходы отличаются способами определения проекций векторов скоростей ветра ( $\vec{v}_0 = \{v_{0x}; v_{0y}; v_{0z}\}$  и  $\vec{\Delta v} = \{\Delta v_x; \Delta v_y; \Delta v_z\}$ ) для фрагментов метеообразования и, следовательно, формами доплеровских спектров эхосигнала.

*Первая модель – колоколообразная форма доплеровского спектра.*

Движение фрагментов МО относительно земной поверхности называется ветром и описывается векторами скоростей относительно взаимно ортогональных осей координат. Для модели выделяют среднюю скорость движения фрагментов (за небольшой промежуток времени) и мгновенную скорость [42,56].

Предполагается, что отклонение значения мгновенной скорости ветра от среднего подчиняется нормальному закону, а распределение значений мгновенных скоростей ветра по объекту имеет форму гауссовской кривой. Т.к. значение доплеровской частоты прямо пропорционально радиальной скорости ветра, то и распределение доплеровских частот по фрагментам МО тоже представляется колоколообразной (гауссовской) кривой [42,56,162–163,169]:

$$G_{D_{i,k,p}}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\omega_{i,k,p}}} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_{0_{i,k,p}})^2}{\sigma_{\omega_{i,k,p}}^2}\right), \quad (4.2.1)$$

где  $\omega_{0_{i,k,p}}$  – среднее значение доплеровского смещения частоты, определяемое средним значением скорости ветра, а  $\sigma_{\omega_{i,k,p}}$  – СКО разброса частот, которое определяется СКО скорости ветра.

Основными параметрами выражения (4.2.1) в такой модели являются центральная частота доплеровского спектра и его ширина. Центральная частота



доплеровского спектра определяется радиальной составляющей вектора скорости ветра относительно РЛС. Ширина доплеровского спектра определяется разбросом значений скорости ветра, перемещением луча антенны РЛС и влиянием неоднородности атмосферных осадков и градиента скорости ветра при увеличении наклонной дальности [42,56].

Выражение (4.2.1) позволяет определить доплеровскую частоту для каждого фрагмента МО на основе заданного для МО распределения скоростей ветра. Т.к. сигналы, отраженные от парциальных объемов метеообразования не коррелированы, то спектр суммарного эхо-сигнала от всего МО определяется суммированием выражения (4.2.1) по всем парциальным объемам:

$$G_D(\omega) = \sum_i \sum_k \sum_p G_{D_{i,k,p}}(\omega).$$

Однако, как показано в [42,56], для метеообразований с наличием турбулентностей описание доплеровского спектра гауссовской кривой является неточным. Поэтому применяется вторая модель – метеорологическая, для которой учитываются корреляционные связи скоростей фрагментов метеообразования.

*Вторая модель основана на метеорологической модели турбулентности.*

Фрагменты МО при движении имеют, как правило, случайные направления и случайные скорости. Это явление называется турбулентностью [56,168]. Элементы турбулентности в пределах одного метеообразования могут сильно отличаться друг от друга как по направлениям и значениям скоростей, так и по линейным размерам.

При моделировании турбулентности используется предположение Тейлора о «замороженной турбулентности», т.е. фрагменты метеообразования перемещаются ламинарным (строго упорядоченным) потоком без изменения их динамических и геометрических характеристик [163,168,170–171]. Это предположение позволяет замещать один турбулентный объект набором стационарных ламинарных областей и переходить от временных характеристик турбулентности к пространственным и наоборот [163,165,171]. Влияние турбулентности на флуктуации скорости ветра описывается соответствующей

пространственной корреляционной функцией, описывающей взаимную связь таких флуктуаций для различных точек пространства [56,163,168].

Рассмотрим такую модель подробнее.

Статистическая связь значений скоростей ветра для фрагментов объекта учитывается введением пространственной корреляционной функции. Как правило, используется допущение: разрешающая способность зондирующих импульсов по дальности меньше радиуса корреляции флуктуаций вектора скорости ветра [56,172]. Это позволяет использовать достаточно простой способ задания распределения коэффициентов взаимной корреляции по проекциям вектора скоростей  $\vec{v}_{i,k,p}$  фрагментов метеообразования [152–153,172–173]. Запишем выражение, учитывающее корреляционные связи для проекции вектора скорости ветра  $v_{x_{i,k,p}}$  вдоль осей координат  $OZ$  и  $OY$ :

$$v_{x_{i,k,p}} = \begin{cases} v_{x_{1,1,p}}, & i = 1, k = 1; \\ r_z \cdot v_{x_{i-1,1,p}} + \sqrt{1-r_z^2} \cdot v_{x_{i,1,p}}, & i \neq 1, k = 1; \\ r_y \cdot v_{x_{1,k-1,p}} + \sqrt{1-r_y^2} \cdot v_{x_{1,k,p}}, & i = 1, k \neq 1; \\ r_z \cdot v_{x_{i-1,k,p}} + r_y \cdot v_{x_{i,k-1,p}} - r_z \cdot r_y \cdot v_{x_{i-1,k-1,p}} + \\ + \sqrt{(1-r_z^2)(1-r_y^2)} \cdot v_{x_{i,k,p}}, & i \neq 1, k \neq 1, \end{cases} \quad (4.2.2)$$

где  $r_z$  и  $r_y$  - коэффициенты корреляции скоростей ветра вдоль соответствующих осей координат.

Корреляционные связи скорости ветра вдоль третьей оси  $OX$  учитывается следующим образом [152–153]:

$$v_{x_{i,k,p}} = \begin{cases} v_{x_{i,k,p}}, & p = 1; \\ r_x \cdot v_{x_{i,k,p-1}} + \sqrt{1-r_x^2} \cdot v_{x_{i,k,p}}, & p \neq 1, \end{cases} \quad (4.2.3)$$

где  $r_x$  - коэффициент корреляции скоростей ветра вдоль оси  $OX$ .

Выражения для  $y$ - и  $z$ -компонент вектора  $\vec{v}_{i,k}$  получаются аналогично.

По выражениям (4.2.1) – (4.2.3) видно, что чем ближе значение коэффициента корреляции по каждой из осей координат к 1, тем меньше разброс значений скоростей от точки к точке и тем уже доплеровский спектр суммарного эхо-сигнала.

*Третья модель характеризует сдвиг ветра в метеообразованиях.*

Третий вид моделей применяется при замещении метеообразований со сдвигом ветра – изменением вектора скоростей фрагментов МО от слоя к слою [56,168].

Полагается, что фрагменты МО вдоль поверхности земли движутся слоями. Слоем называется устойчивая область МО. Изменение векторов скорости ветра для близких точек пространства называется сдвигом ветра. В простейшем случае рассматривается изменение скорости ветра от слоя к слою [168,170–171].

Рассмотрим простейшую разновидность этого явления – осесимметричный сдвиг ветра. Ось симметрии проходит перпендикулярно линии визирования РЛС по центру метеообразования. Радиальная проекция скорости ветра для фрагментов МО при таком сдвиге ветра описывается выражениями:

$$\begin{cases} v_{r_{i,k,p}}^{(L)}(L) = v_{r0_{i,k,p}} + \frac{\partial v}{\partial L}(L - L_{\min}), L \in [L_{\min}; L_{\min} + 0.5\Delta L]; \\ v_{r_{i,k,p}}^{(L)}(L) = v_{r0_{i,k,p}} + \frac{\partial v}{\partial L}(L_{\min} + 2\Delta L - L), L \in [L_{\min} + 0.5\Delta L; L_{\max}], \end{cases} \quad (4.2.4)$$

где  $v_{r_{i,k}}^{(L)}$  – значение радиальной проекции скорости ветра для фрагмента,  $v_{r0_{i,k}}$  – значение радиальной переносной скорости воздушных потоков,  $L_{\min}$  – минимальная наклонная дальность,  $L_{\max}$  – максимальная,  $\Delta L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}$ , а

$\frac{\partial v}{\partial L}$  – задаваемое значение градиента радиальной скорости ветра.

Выражение (4.2.4) позволяет рассчитать радиальную проекцию скорости ветра для каждого фрагмента метеообразования.

*Влияние скорости носителя РЛС на доплеровский спектр МО.*

Если в моделях рассматриваются компоненты вектора скорости ветра в ДСК, то необходимо перейти к радиальным проекциям скорости вектора скорости  $\vec{v}$ , где  $(\varphi_{CTi,k,p}; \theta_{CTi,k,p})$  – угловые координаты точек стартовой модели:

$$v_{r_{i,k,p}} = v_{x_{i,k,p}} \cos(\varphi_{CTi,k,p}) \cos(\theta_{CTi,k,p}) + v_{y_{i,k,p}} \sin(\varphi_{CTi,k,p}) \cos(\theta_{CTi,k,p}) + v_{z_{i,k,p}} \sin(\theta_{CTi,k,p}). \quad (4.2.5)$$

Доплеровская частота для фрагмента МО определяется на основе его радиальной проекции скорости ветра как

$$f_{i,k,p} = \frac{2v_{r_{i,k,p}}}{\lambda}. \quad (4.2.6)$$

В реальных условиях помимо перемещения фрагментов метеообразования имеет место и перемещение РЛС относительно земной поверхности. Например, бортовая РЛС, размещенная в составе воздушного судна [10,38,56]. Изменения в радиальной проекции относительной скорости РЛС-цель приведут к изменению доплеровского спектра суммарного эхо-сигнала в точке приема.

Необходимо рассматривать скорость фрагментов МО относительно скорости носителя РЛС, а также учитывать влияние последней на углы визирования по азимуту и углу места.

Пусть вектор скорости носителя задан в декартовых координатах как  $\vec{v}_H = \{v_{Hx}; v_{Hy}; v_{Hz}\}$ . Направление максимума диаграммы направленности РЛС -  $(\varphi_{дн}; \theta_{дн})$ .

Тогда радиальная компонента  $v_r^{(o)}_{i,k,p}$  вектора относительной скорости перемещения фрагментов МО определяется подстановкой компонент вектора скорости носителя и его направления в выражение (4.2.5):

$$\left\{ \begin{aligned} v_{r_{i,k,p}}^{(o)} &= (v_{x_{i,k,p}} - v_{Hx}) \cos(\varphi_{CTi,k,p}^{(o)}) \cos(\theta_{CTi,k,p}^{(o)}) + \\ &+ (v_{y_{i,k,p}} - v_{Hy}) \sin(\varphi_{CTi,k,p}^{(o)}) \cos(\theta_{CTi,k,p}^{(o)}) + (v_{z_{i,k,p}} - v_{Hz}) \sin(\theta_{CTi,k,p}^{(o)}); \\ \varphi_{CTi,k,p}^{(o)} &= \varphi_{CTi,k,p} - \arctg\left(\frac{v_{Hz}}{v_{Hx}}\right) - \varphi_{ДН}; \\ \theta_{CTi,k,p}^{(o)} &= \theta_{CTi,k,p} - \arcsin\left(\frac{v_{Hy}}{v_{Hx}}\right) - \theta_{ДН}, \end{aligned} \right. \quad (4.2.7)$$

где  $(\varphi_{CTi,k,p}^{(o)}; \theta_{CTi,k,p}^{(o)})$  - координаты точек модели относительно линии визирования РЛС

С точки зрения моделирования угловых шумов метеообразования модели распределения скоростей ветра имеют существенное различие. Для модели с колоколообразной аппроксимацией формы доплеровского спектра не моделируется структура турбулентности в пределах элемента разрешения.

Выражения (4.2.2) – (4.2.4) и (4.2.7) позволяют рассчитать радиальные проекции скорости ветра для каждого фрагмента МО, а выражение (4.2.6) – определить соответствующую этому фрагменту доплеровскую частоту. Фактически, можно считать, что каждый парциальный объем, попавший в пределы элемента разрешения РЛС, отражает эхосигнал с доплеровским спектром, состав которого определяется выражением (4.2.6). С учетом этого можно говорить, что метеообразование обладает свойством делимости пространственной и временной переменных в функциях  $F_r(x, y, z, \tau)$  и  $F_s(x, y, z, \tau)$ , что существенно упрощает синтез малоточечной модели [62]. Фактически, это означает, что все точки каждой из малоточечных геометрических моделей (некогерентной и частично когерентной) будут излучать сигналы с одинаковыми по форме СПМ. Отличия будут лишь в их уровнях, определяемых параметрами ПРВ угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям.

Напротив, модель с учетом пространственных корреляционных связей ветра, позволяет сформировать структуру турбулентности. Каждый парциальный

объем отражает эхо-сигнал с характерным только ему доплеровским спектром. Для такой модели нельзя говорить о разделимости пространственной и временной переменных в функциях  $F_r(x, y, z, \tau)$  и  $F_s(x, y, z, \tau)$  [62].

В модели сдвига ветра, как видно из соотношений (4.2.4), объект обладает свойством разделимости пространственной и временной переменной по азимутальной оси и не обладает по угломестной. С учетом этого точки модели, соответствующие одинаковым индексам  $k$  и  $p$  в выражениях (4.2.7), излучают сигналы с одинаковой формой СПМ, независимо от значения индекса  $i$ .

*Требования к мощности, излучаемой точками модели.*

Форму доплеровского спектра помимо скорости движения фрагмента определяет его отражательная способность, которая характеризует мощность сигнала, подводимого к соответствующей точке модели [10,38,42,56].

Мощность зависит от геометрических параметров системы РЛС-цель, свойств метеообразования и от рабочих характеристик испытуемого устройства. Известно уравнение радиолокации для метеорологических целей, определяющее связь дальности до цели, коэффициента отражения фрагментов МО, характеристик РЛС и принимаемой мощности [56]:

$$\text{дБZ} = C + P_{np} + 20\lg(L), \quad (4.2.8)$$

где  $C$ , дБ – постоянная, называемая метеорологической константой РЛС при принимаемой мощности  $P_{np}$ , выраженной в дБм, и учитывающая мощность излучения, усиление и затухание для приемника и передатчика, угловую разрешающую способность по азимуту и углу места и др.;  $L$  – дальность до цели в км.

Параметр дБZ является выраженным в дБ коэффициентом отражения для МО в рассматриваемом элементе разрешения (одновременно отражающем объеме). Его значение определяется свойствами МО [56]:

$$\text{дБZ} = 10\lg\left(a_Z I^{b_Z}\right), \quad (4.2.9)$$

где  $a_Z$  и  $b_Z$  – константы, определяемые таблично по свойствам осадков;  $I$  (мм/час) – интенсивность осадков. Пример для нескольких типов осадков из [56] и [174] приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Некоторые типы осадков и их параметры

Тип осадков	$a_Z$	$b_Z$
Дождь в атмосферном слое (слоистый)	200	1.6
Ураганы и конвективные облака по типу грозových	300	1.4
Орографический дождь	31	1.71
Грозовой ливень	486	1.37
Снег	2000	2.0

Таким образом, уровень мощности, отраженный попавшей в элемент разрешения областью МО и принимаемый РЛС, определяется из выражения (4.2.8) следующим образом:

$$P_{np}(L) = \text{дБЗ} - C - 20\lg(L), \quad (4.2.10)$$

где  $P_{np}$  [дБм] является уровнем мощности суммарного эхо-сигнала сигнала от одного элемента разрешения в точке приема. Переведем  $P_{np}$  из [дБм] в значение мощности [Вт]:

$$\sigma_H^2(L) = 10^{\frac{P_{np}(L)}{10} - 3}. \quad (4.2.11)$$

Определим мощности сигналов, подводимых к точкам стартовой модели следующим образом.

Если МО состоит из одного типа осадков (однородно), то можно предположить, что мощности, отраженные от каждого парциального элемента в

пределах одного элемента разрешения одинаковы:  $\sigma_{i,k,p}^2 = \sigma^2$ . Тогда мощность суммы сигналов в точке приема можно представить следующим образом:

$$\sigma_H^2(L) = \sum_{p_L} \sum_{i_L} \sum_{k_L} \sigma_{i,k,p}^2, \quad (4.2.12)$$

где  $p_L$ ,  $i_L$  и  $k_L$  – номера парциальных объемов, попавших в элемент разрешения по соответствующим осям координат. Количество парциальных объемов, попавших в элемент разрешения соответственно равно  $K_{p_L}$ ,  $K_{i_L}$  и  $K_{k_L}$ .

Из (4.2.12) получаем выражение для определения мощностей сигналов, отраженных от фрагментов МО в пределах одного элемента дальности:

$$\sigma_{i,k,p}^2 = \frac{\sigma_H^2(L)}{K_{i_L} K_{p_L} K_{k_L}}. \quad (4.2.13)$$

Таким образом, мощность суммарного эхо-сигнала от одного элемента разрешения в точке приема определяется количеством попавших в него парциальных объемов метеообразования и их отражательной способностью.

Если МО содержит несколько областей с разными типами осадков, то оно считается неоднородным. При синтезе стартовой модели для каждой из этих областей необходимо отдельно определить значения  $\text{dBZ}$ ,  $\sigma_H^2$  и  $\sigma_{i,k,p}^2$ . Значение метеорологической константы  $C$ , зависящее от размера элемента разрешения, должно изменяться для каждой из рассматриваемых однородных областей.

Значение метеорологической постоянной зависит от размеров элемента разрешения следующим образом [56]:

$$C = C_{PJC} - \lg(\Delta\varphi\Delta\theta\Delta\tau), \quad (4.2.14)$$

где  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\theta$  – размеры элемента разрешения по азимуту и углу места соответственно,  $\Delta\tau$  – длительность зондирующего импульса, определяющая размер элемента разрешения по дальности, а  $C_{PJC}$  – составляющая метеорологической константы, не зависящая от ширины диаграммы направленности антенны и разрешающей способности по дальности [56].



Таким образом, выделение однородного участка из области метеообразования, попавшего в элемент разрешения РЛС, соответствует изменению размеров элемента разрешения в слагаемом  $\lg(\Delta\varphi\Delta\theta\Delta\tau)$  и соответственному изменению значения постоянной  $C$ .

Пусть в элемент разрешения попало  $n$  областей с разными типами осадков. Размеры этих областей равны  $\Delta\varphi_n$ ,  $\Delta\theta_n$  и  $\Delta\tau_n$ . Тогда значение метеорологической постоянной для каждой из областей определяется следующим выражением:

$$C_n = C_{РЛС} - \lg(\Delta\varphi_n\Delta\theta_n\Delta\tau_n). \quad (4.2.15)$$

При этом, из равенства суммы размеров областей размеру элемента разрешения следует, что

$$\Delta\varphi_0\Delta\theta_0\Delta\tau_0 = \sum_n \Delta\varphi_n\Delta\theta_n\Delta\tau_n, \quad (4.2.16)$$

где  $\Delta\varphi_0, \Delta\theta_0$  и  $\Delta\tau_0$  – размеры элемента разрешения РЛС.

Для каждой области МО после расчета по выражению (4.2.15) метеорологической константы необходимо по выражениям (4.2.10) – (4.2.13) определить  $\text{дБZ}$ ,  $\sigma_H^2$  и  $\sigma_{i,k,p}^2$ .

Полученное выражение (4.2.13), с учетом (4.2.9) – (4.2.11) и (4.2.15), позволяет определить мощности сигналов, излучаемых из точек стартовой многоточечной модели, как для однородного, так и для неоднородного метеообразования.

Таким образом, при синтезе стартовой модели замещаемого метеообразования необходимо определить:

1. Количество излучателей вдоль осей координат -  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_k$ .
2. Мощности сигналов, подводимых к точкам модели –  $\sigma_{i,k,p}^2$ .
3. Распределение скоростей ветра  $\vec{v}_{i,k,p} = \{v_x; v_y; v_z\}$  по точкам модели, на основании которого рассчитывается состав доплеровского спектра помехи  $f_{i,k,p}$ .

*Количество точек модели* определяет точность, с которой в модели учитываются свойства замещаемого объекта. Применительно к метеообразованиям количество точек стартовой модели определяет точность воспроизведения турбулентных явлений в его пределах и точность представления формы. При этом естественно желание получить как можно большее количество точек стартовой модели. Однако очевидно, что увеличение точек приводит к росту требуемого объема памяти, повышению требований к быстродействию вычислительных средств имитатора. Например, для метеообразования, составленного из 1000000 точек, объем хранимой информации (мощность, отражаемая от каждого из фрагментов, проекции средней скорости ветра и разброс по каждой из осей) составляет порядка 280 МБ. При полунатурном моделировании требуется обработка этого массива в реальном масштабе времени. При размере парциального объема в  $10 \times 10 \times 10$  м, общий объем такого метеообразования составит всего лишь  $1 \text{ км}^3$ .

Вопрос выбора размера парциального элемента при замещении метеообразований рассмотрен в [175–176]. Рекомендуется выбирать размер парциального элемента (а значит и общее их количество исходя из заданных размеров метеообразования) с учетом пространственной корреляции вектора скорости ветра.

Возможно использование парциального элемента соизмеримого по размерам с элементом разрешения РЛС, если радиус пространственной корреляции вектора скорости ветра значительно превышает линейный размер элемента разрешения РЛС. Такой подход можно использовать для метеорологической модели турбулентности при значении коэффициента корреляции вектора скорости ветра, превышающем 0.95, и в модели сдвига ветра для оси азимут [175–176].

При слабой корреляции ветра допустимо использование парциальных элементов в 12 раз меньших линейного размера элемента разрешения [175–176].

*Мощности сигналов*, подводимых к точкам модели рассчитываются по выражениям (4.2.9) – (4.2.13) для заданного типа осадков, определяющих

значение отражательной способности в дБZ в выражении (4.2.9), и для заданных свойств РЛС, согласно [56], определяющих значение метеорологической константы.

*Распределение скоростей ветра* определяется на основе одной из моделей: колоколообразная аппроксимация формы доплеровского спектра (выражение (4.2.1)), метеорологическая модель турбулентности (выражения (4.2.2) – (4.2.3)) или сдвиг ветра (выражение (4.2.4)). На основе этого распределения и мощностей сигналов по выражениям (4.2.6) – (4.2.7) рассчитывается доплеровский спектр помехи при приеме эхо-сигналов от области МО, попавшей в элемент разрешения РЛС.

### 4.3. Синтез некогерентной модели

На основе многоточечной стартовой модели возможен синтез малоточечной некогерентной модели по методам, подробно рассмотренным в [62,70,102] и [139,142,143].

Малоточечная некогерентная модель, в отличие от многоточечной стартовой, замещает только ту область распределенного объекта, которая попала в пределы элемента разрешения РЛС. Для моделирования отражений от области МО, попадающей в элементы разрешения вдоль всей линии визирования, синтезируется множество некогерентных моделей, каждая из которых замещает соответственный элемент дальности, в который попадают фрагменты распределенного объекта. Количество синтезируемых некогерентных моделей в общем случае равно количеству элементов дальности.

Для синтеза некогерентной модели требуются [62] значения параметров плотности распределения вероятностей угловых шумов  $m_\varphi$ ,  $m_\theta$  и  $\mu_\varphi$ ,  $\mu_\theta$  для азимутальной и угломестной осей координат соответственно, мощности и СПМ или КФ квадратур эхо-сигналов от фрагментов МО, попавших в элемент разрешения, в точке приема.

Параметры ПРВ угловых шумов  $m_\varphi$ ,  $m_\theta$  и  $\mu_\varphi$ ,  $\mu_\theta$  определяются по следующим выражениям [41,62]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\xi} = \frac{\int_{\xi_r}^{\xi} \xi F_r(\xi) d\xi}{\int_{\xi_r}^{\xi} F_r(\xi) d\xi}; \\ \mu_{\xi} = \frac{\sqrt{\frac{\int_{\xi} F_r(\xi) d\xi}{\xi}}}{\sqrt{\int_{\xi} (\xi - m_{\xi})^2 F_r(\xi) d\xi}}, \end{array} \right. \quad (4.3.1)$$

Изменение координаты  $\xi$  ограничено размерами элемента разрешения.

Запишем выражения (4.3.1) в удобной для практической реализации форме. Для этого рассмотрим возможные положения элемента разрешения в пределах замещаемого метеообразования. Можно рассмотреть два случая их взаимной ориентации:

1. Элемент разрешения располагается в толще метеообразования. Кромка распределенного объекта не попадает в пределы элемента разрешения (рис. 4.0.2).
2. Элемент разрешения располагается на краю метеообразования. Кромка распределенного объекта попадает в пределы элемента разрешения (рис. 4.3.1).

Если элемент разрешения не попадает на границу распределенного объекта, т.е. если весь элемент разрешения занимают фрагменты распределенного объекта (см. рис. 4.0.2), то с учетом предположения об однородности замещаемого метеообразования, распределение интенсивности отражения в пределах элемента разрешения равномерно. В [41] показано, что параметры ПРВ при этом принимают значения  $m_{\xi} = 0$  и  $\mu_{\xi} = \sqrt{3}$ .

Если в элемент разрешения попадает граница распределенного объекта (см. рис. 4.3.1), то для области элемента разрешения, в которой отсутствует распределенный объект, значение функции  $F_r(\xi) = 0$  (область не отражает), что позволяет переписать выражения (4.3.1) следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\xi} = \frac{\int_{\xi_{-}}^{\xi_{+}} \xi F_r(\xi) d\xi}{\int_{\xi_{-}}^{\xi_{+}} F_r(\xi) d\xi}; \\ \mu_{\xi} = \sqrt{\frac{\int_{\xi_{-}}^{\xi_{+}} F_r(\xi) d\xi}{\int_{\xi_{-}}^{\xi_{+}} (\xi - m_{\xi})^2 F_r(\xi) d\xi}}, \end{array} \right. \quad (4.3.2)$$

где значения  $\xi_{-}$  и  $\xi_{+}$  определяют область элемента разрешения, в которую попал распределенный объект, как показано на рис. 4.3.1.

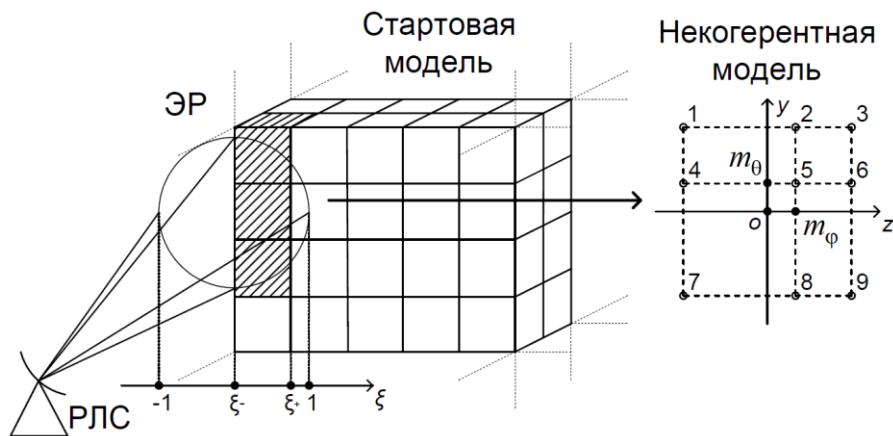


Рисунок 4.3.1 – Замещение элемента разрешения малоточечной некогерентной моделью

В таком случае для однородного метеообразования параметры ПРВ рассчитываются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\xi} = \frac{(\xi_{+} + \xi_{-})}{2}; \\ \mu_{\xi} = \frac{\sqrt{12}}{|\xi_{+} - \xi_{-}|}. \end{array} \right. \quad (4.3.3)$$

Важно отметить, что попадание кромки метеообразования в пределы элемента разрешения необходимо учитывать отдельно по осям азимут и угол места.

На основании рассчитанных параметров  $m_\varphi$ ,  $m_\theta$  и  $\mu_\varphi$ ,  $\mu_\theta$  можно рассчитать мощности сигналов, подводимых к точкам некогерентной модели. Методы расчета СПМ, КФ и мощностей сигналов, подводимых к излучателям моделей подробно рассмотрены в [62,70,102] и [139,142–143].

#### 4.4. Синтез частично когерентной модели

Как было показано в разделе 2, для двумерной девятиточечной некогерентной модели можно подобрать эквивалентную ей двумерную четырехточечную частично когерентную модель, к излучателям которой подводятся коррелированные сигналы.

Запишем последовательность перехода от двумерной некогерентной модели к двумерной частично когерентной.

– Синтезированная двумерная некогерентная модель проецируется на ортогональные оси координат. По соотношениям (2.2.13) и (3.2.19) определяются мощности и СПМ или КФ квадратур сигналов моделей-проекций.

– От проекций некогерентной модели на оси координат осуществляется переход к проекциям частично когерентной модели на оси координат. По выражениям (2.2.14) определяются мощности и коэффициенты взаимной корреляции излучаемых сигналов. Выражения (3.2.4) определяют собственные спектрально-корреляционные свойства сигналов частично когерентной модели-проекции по известным спектрально-корреляционным свойствам некогерентной модели-проекции.

– На основании полученных для моделей-проекций параметров сигналов, СПМ или КФ квадратур и параметров ПРВ угловых шумов по выражениям (2.2.15) определяются мощности сигналов, подводимых к излучателям искомой двумерной четырехточечной частично когерентной модели. СПМ или КФ квадратур этих сигналов определяются по выражениям (3.2.20) – (3.2.23).

#### 4.5. Пример синтеза частично когерентной модели метеообразования

Рассмотрим пример синтеза двумерной четырехточечной частично когерентной модели на основе многоточечной стартовой [177–178].

Для синтеза стартовой многоточечной геометрической модели был разработан модуль программного обеспечения имитатора радиосигналов. Модуль представляет собой программный макет, который на основе набора входных параметров синтезирует стартовую модель объемно распределенного метеообразования: геометрические параметры, распределение отражательной способности и скоростей ветра. Входными параметрами являются:

- а) параметры формы МО: Размеры объекта, количество точек стартовой модели вдоль декартовых осей координат и совокупное количество точек модели;
- б) параметры отражательной способности: радиолокационная постоянная РЛС и параметры осадков, необходимые для расчета отражательной способности выраженной в dBZ;
- в) распределение скоростей ветра: тип модели распределения скоростей, значение средней скорости, разброса скоростей или градиента скорости ветра.

Внешний вид интерфейса программного модуля для окна задания распределения скоростей приведен на рис. 4.5.1.

Для перехода к частично когерентной модели синтезирована стартовая модель, замещающая однородное двумерное метеообразование, характеризуемое метеорологической моделью турбулентности. Тип осадков – дождь в атмосферном слое с интенсивностью 10 мм/час. Вектор средней скорости ветра для каждого фрагмента МО в декартовых осях координат равен  $\vec{v}_0 = \{15; 5; -2\}$  м/с. Вектор СКО скоростей ветра относительно РЛС для каждого фрагмента равен  $\vec{\Delta v} = \{3; 2; 1\}$  м/с. Коэффициенты корреляции скоростей ветра по осям  $OY$  и  $OZ$  соответственно равны  $r_y = 0.9$  и  $r_z = 0.8$ . Коэффициент корреляции по оси  $OX$   $r_x = 0.9$ . Рабочая частота РЛС равна 10 ГГц. Направление визирования РЛС -  $(10; 15)^\circ$ . Угловые размеры элемента разрешения составляют  $1.5^\circ$  по азимуту и  $2^\circ$

по углу места. Угловые размеры элемента разрешения нормированы так, чтобы их границы соответствовали значениям обобщенной угловой координаты  $[-1;1]$  как по азимуту, так и по углу места. Расстояние от РЛС до цели (замещаемого элемента разрешения) равно 5 км. Метеорологическая константа РЛС равна 60 дБ. Количество точек стартовой модели, попавших в элемент разрешения, равно 4000: 20 точек по оси  $OZ$ , 20 точек по оси  $OY$  и 10 точек по оси  $OX$ .

На основе синтезированной стартовой модели осуществлен переход к малоточечной некогерентной и далее – к малоточечной частично когерентной модели. Т.к. достоверность замещения стартовых моделей некогерентными подтверждена в ряде работ [62,63,69,134,141], то в разработанном макете проводилось сравнение только ПРВ и АКФ пеленга для стартовой и частично когерентной модели.

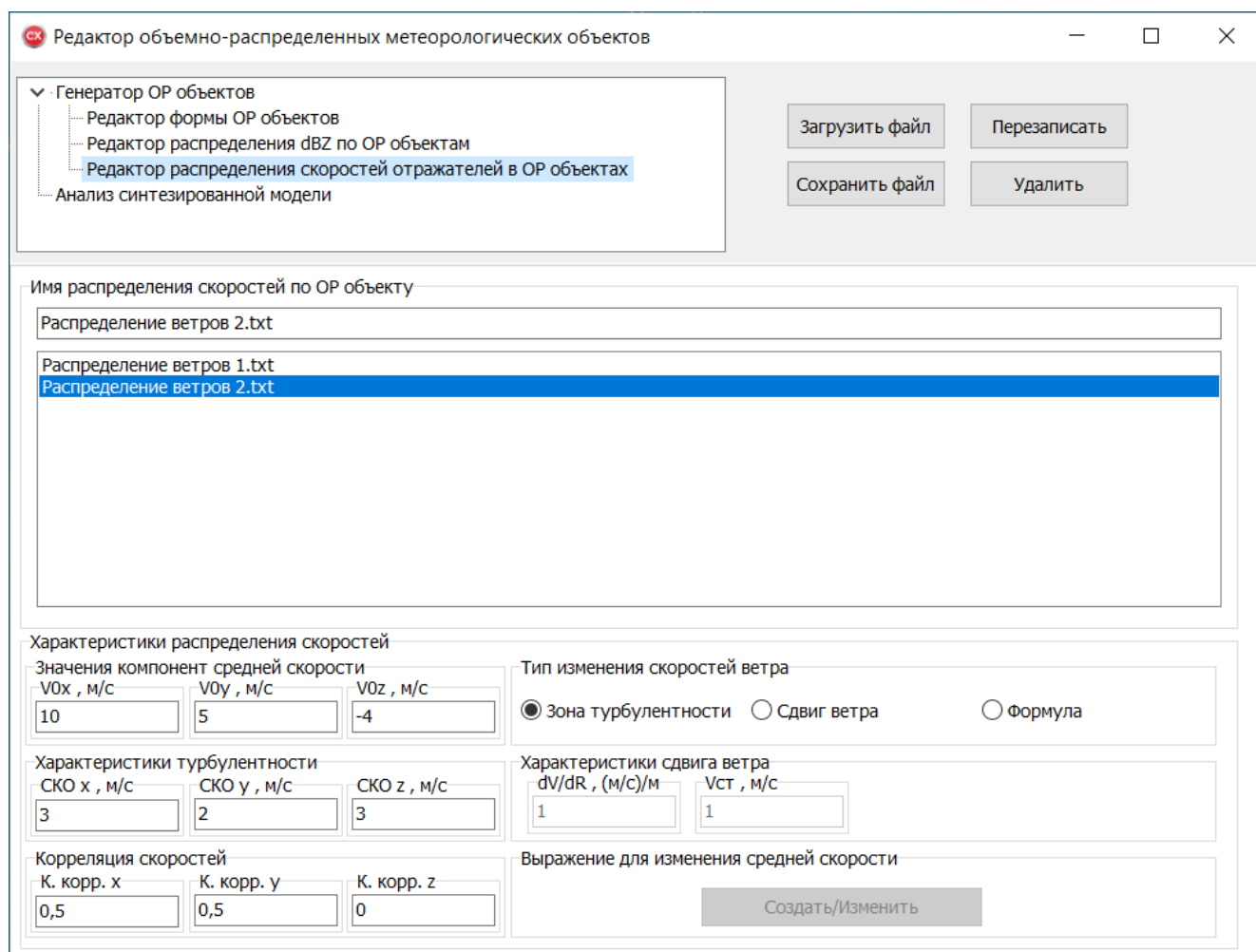


Рисунок 4.5.1 – Внешний вид окна распределения скоростей программного модуля генератора стартовой модели метеообразования



Моделирование приема сигналов от малоточечных моделей проводилось по методу моноимпульсной пеленгации, подробно описанному в [39,151,153]. Результат моделирования представлял собой усредненные по 20 реализациям ПРВ и АКФ пеленга для двух ортогональных осей координат, а также рассчитанные параметры ПРВ. Количество отсчетов пеленга равно 20000. Сравнение зависимостей производилось по критерию согласия Пирсона с поправкой Йейтса при допустимом уровне ложной тревоги 0.05 для обеих осей координат.

Результаты моделирования для элемента разрешения, не попавшего на границу МО, приведены на рис. 4.5.2 – 4.5.3.

Допустимое значение критерия для ПРВ пеленга по азимуту на рис. 4.5.2 составило  $\chi^2 = 87.1081$  и  $\chi^2 = 156.5063$  для азимутальной и угломестной оси соответственно. Рассчитанное значение для этих осей равно 24.0098 и 101.1117. Оценка совпадения ПРВ пеленга проводилась в диапазоне значений обобщенной координаты  $\xi = [-3; 3]$ . Параметры ПРВ, как видно из графиков, соответствуют расчетным значениям  $m_\xi = 0$  и  $\mu_\xi = \sqrt{3}$ .

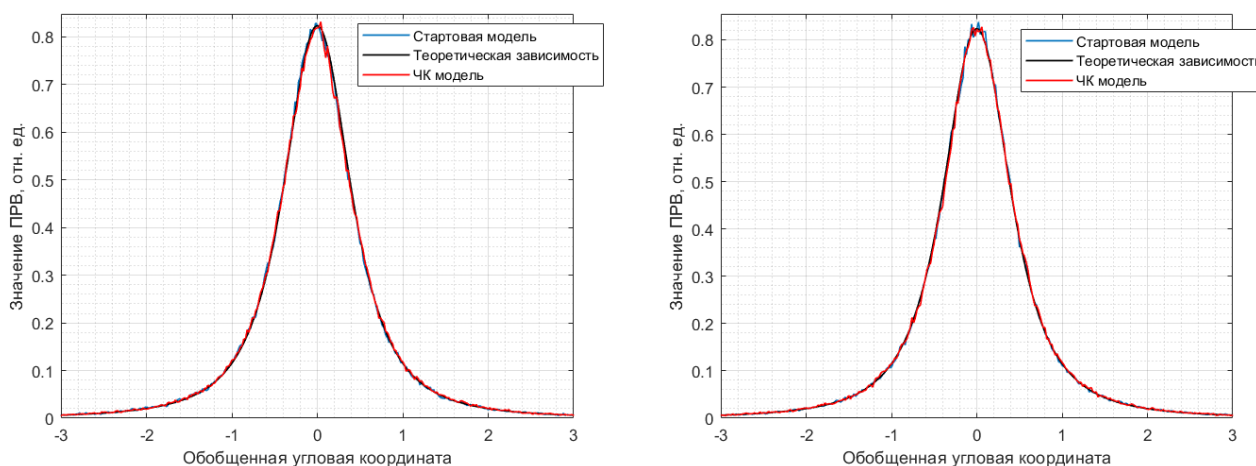


Рисунок 4.5.2 – Сравнение ПРВ пеленга для стартовой многоточечной и частично когерентной малоточечной моделей по осям азимут (слева) и угол места

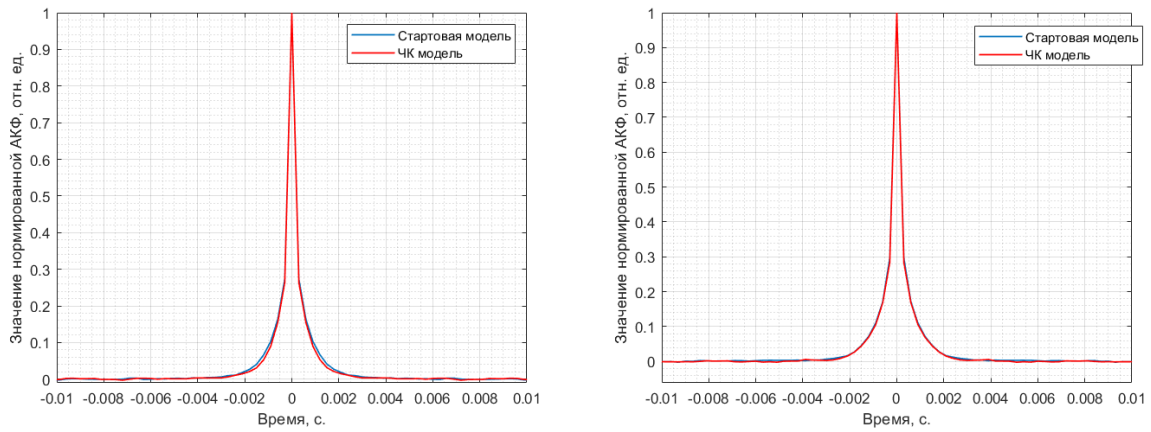


Рисунок 4.5.3 – Сравнение АКФ пеленга для стартовой многоточечной и частично когерентной малоточечной моделей по осям азимут (слева) и угол места

Допустимое значение критерия для АКФ пеленга по азимуту на рис. 4.5.3 составило  $\chi^2 = 72.1532$  и  $\chi^2 = 88.2502$  для азимутальной и угломестной оси соответственно. Рассчитанное значение для этих осей равно 4.1887 и 6.5786 соответственно. Оценка совпадения АКФ пеленга проводилась в диапазоне  $\pm 20$  отсчетов АКФ или  $\pm 6$  мс относительно максимума.

Результаты моделирования для элемента разрешения, попавшего на границу МО, приведены на рис. 4.5.4 – 4.5.5. Координаты границы объекта в элементе разрешения по обеим осям координат равны  $[0;1]$ .

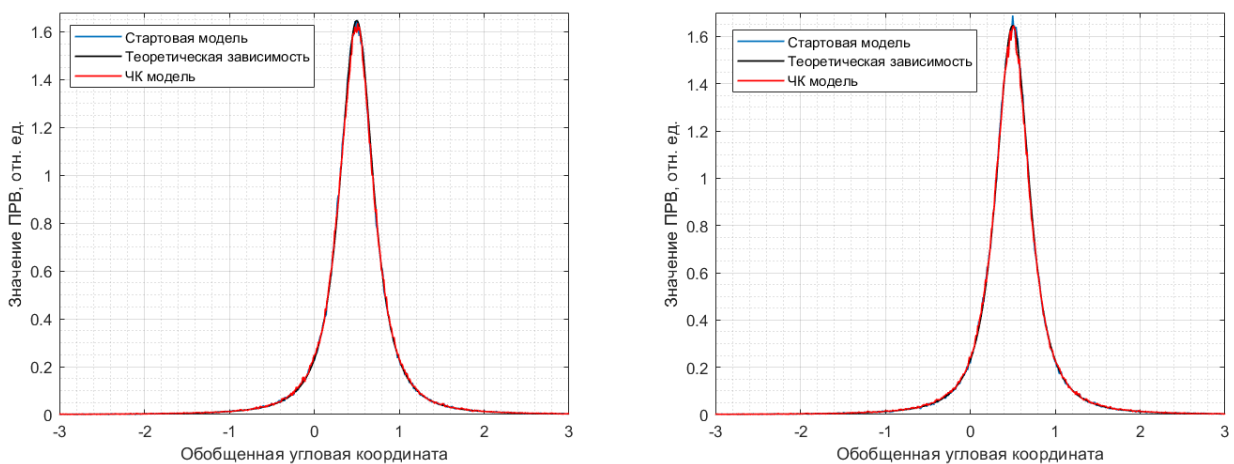


Рисунок 4.5.4 – Сравнение ПРВ пеленга для стартовой многоточечной и частично когерентной малоточечной моделей по осям азимут (слева) и угол места

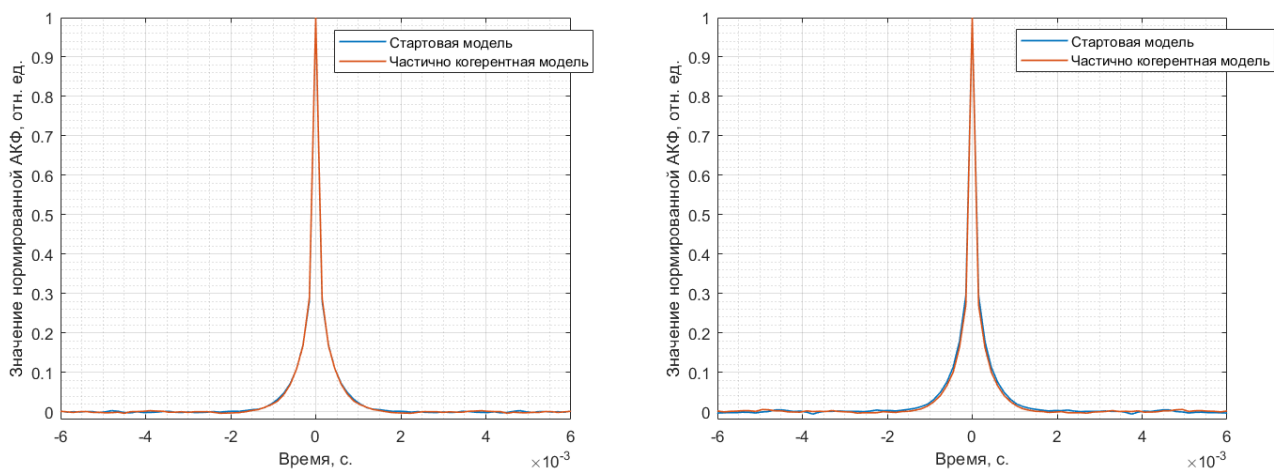


Рисунок 4.5.5 – Сравнение АКФ пеленга для стартовой многоточечной и частично когерентной малоточечной моделей по осям азимут (слева) и угол места

Допустимое значение критерия для ПРВ пеленга по азимуту на рис. 4.4.4 составило  $\chi^2 = 156.5063$  и  $\chi^2 = 156.5063$  для азимутальной и угломестной оси соответственно. Рассчитанное значение для этих осей равно 17.4723 и 33.7501 соответственно. Оценка совпадения ПРВ пеленга проводилась в диапазоне значений обобщенной координаты  $\xi = [-3; 3]$ . Параметры ПРВ, как видно из графиков, соответствуют расчетным значениям  $m_\xi = 0.5$  и  $\mu_\xi = 3.46$ .

Допустимое значение критерия для АКФ пеленга по азимуту на рис. 11 составило  $\chi^2 = 72.1532$  и  $\chi^2 = 88.2502$  для азимутальной и угломестной оси соответственно. Рассчитанное значение для этих осей равно 3.8253 и 10.2311 соответственно. Оценка совпадения АКФ пеленга проводилась в диапазоне  $\pm 20$  отсчетов АКФ или  $\pm 6$  мс относительно максимума.

Для каждой зависимости на графиках рис. 4.5.2 – 4.5.5 рассчитанное по результатам моделирования значение критерия хи-квадрат Пирсона с поправкой Йейтса меньше, чем его допустимое значение. Это подтверждает сходимость сравниваемых зависимостей [152].

#### 4.6. Заключение по четвертому разделу

На основе полученных в разделах 2 и 3 теоретических результатов разработан алгоритм синтеза двумерной четырехточечной частично когерентной модели метеообразования с учетом угловых шумов. Алгоритм представляет собой последовательный синтез малоточечной некогерентной модели на основе стартовой многоточечной геометрической модели и синтез малоточечной частично когерентной модели на основе некогерентной. При наличии ранее синтезированной стартовой или некогерентной модели объекта радиолокации соответствующий пункт алгоритма и все предыдущие пропускаются.

В разделе сформулированы требования к синтезируемой стартовой модели метеообразования: к количеству точек модели, к распределению мощностей и скоростей ветра по точкам модели.

Приведены выражения (4.2.1) – (4.2.7), позволяющие рассчитать распределение скоростей ветра по каждому парциальному объему для трех видов моделей: гауссовской кривой, метеорологической модели турбулентности и модели сдвига ветра. Модели отличаются способами определения проекций векторов скоростей ветра и учетом корреляционных связей. На основе полученного распределения скоростей при переходе к малоточечным моделям рассчитывается доплеровский спектр сигналов, подводимых к излучателям.

Получены соотношения (4.2.9) – (4.2.13) и (4.2.15), позволяющие рассчитать мощности эхосигналов от каждого из парциальных объемов для однородного и неоднородного метеообразования.

Полученные выражения (4.3.3) позволяют рассчитать параметры ПРВ угловых шумов  $m$  и  $\mu$  при попадании в элемент разрешения границы метеообразования.

Для подтверждения адекватности полученных результатов разработан программный макет, синтезирующий стартовую модель угловых шумов метеообразования. На основе синтезированной модели был осуществлен переход к некогерентной и частично когерентной модели. Для некогерентной и частично

когерентной модели имитировался прием сигналов и проводилась оценка пленга. Сравнение по методу наименьших квадратов подтверждает сходимость зависимостей ПРВ и АКФ пленга для рассматриваемых моделей и, следовательно, адекватность полученных теоретических результатов.

## 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, 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 объектов радиолокации, распределенных по угловым координатам.

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 литературы

1. Дорожко В. М. Имитационная модель радиолокационного эхо-сигнала, Дальневост. матем. журн., 2001, том 2, номер 1, 98–113.
2. Corsini Giovanni. A radar echo simulator based on  $\mu$ P TMS320. Terreni Pierangelo "Proc. MELECON'85. Mediterranean Electrotechn. Conf. Madrid. Oct. 8–10. 1985, vol. 2". Amsterdam e.a., 1985, pp. 327–330.
3. Michaels John F. "Radar-82: Int. Conf., London, 18–20 Oct., 1982". London; New-York, 1982, pp. 245–249.
4. Carriere Rob., Moses Randolph L. High resolution radar target modeling using a modified prony estimator. IEEE Trans. Antennas and Propag, 1992, vol. 40, N. 1. pp. 13–18.
5. Марков Ю. В., Боков А. С., Важенин В. Г., Мухин В. В., Нестеров, М. Ю., Иофин, А. А.. Моделирование отраженных радиолокационных сигналов для многоканальной системы дистанционного зондирования земли. *Надежность и качество сложных систем*, (1 (29)), (2020), 24–34.
6. Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Математическая модель радиолокационного сигнала, отраженного от земной поверхности // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2012. №6.
7. Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Математические модели сигналов, отраженных от объемно-распределенных отражателей // Труды БГТУ. – 2011. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 97–101.
8. Созинов П. А., Горевич Б. Н. Методы оценки и исследование зависимости точности целеуказания бортовому локатору ракеты от ошибок определения координат цели и ракеты наземным локатором. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2021;(1):22–41.
9. Романов А. Н. Тренажеры для подготовки операторов РЛС с помощью ЭВМ. Воениздат. Москва, 1980. – 126 с.
10. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 508 с.



11. Robert E. Shannon. Systems simulation: The art and science // NJ: Prentice-Hall, 1975 – 387p.
12. Леонов А. И., Леонов С. А., Нагулинко Ф.В. и др. Испытания РЛС (оценка характеристик) // М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
13. Скурихин В. И., Шифрин В. Б., Дубровский В. В. Математическое моделирование. К.: Техника, 1983. – 270 с.
14. Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С. В. Емельянова. Москва: Машиностроение, 1988. – 520 с.
15. Arikan, F.; Raemer, H. . A methodology for modeling and simulation of radar clutter and multipath. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 10(2), (2006) 215–242.
16. Романов А. Н. Тренажеры для подготовки операторов РЛС с помощью ЭВМ. Воениздат. Москва, 1980. – 126 с.
17. Урсатьев А. А., Погребная Н. П. Полунатурная модель сигнально-помеховой радиолокационной обстановки // Управляемые системы и машины. 1991. № 4. С. 102–111.
18. Тверской Г. Н., Терентьев И. П., Харченко Г. К. Имитаторы эхосигналов судовых радиолокационных станций. Судостроение. Ленинград, 1973. – 224 с.
19. Васильева А. В., Калмыков Н. Н., Мельников С. А., Соловьев В. В. Модель коррелированных сигналов для имитатора скорости корреляционного радиолокационного измерителя // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2016. № 4. С. 18–23.
20. Канащенков А. И., Меркулов В. И., Самарин О. Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. ИПРЖР. Москва, 2002. – 176 с.
21. Антипов В. Ю., Метельников А. Ю., Токарев Е. Г. Метод и технология полунатурного моделирования бортовых радиосистем ближнего

действия фазодоплеровского типа // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2016. № 1. С. 32–41.

22. Gorshkov S. A., Leshcenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Yu., Shirman Ya. D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking. Artech House, 2002. – 307 p.

23. Mahafza B. R. Introduction to Radar Analysis (Advances in Applied Mathematics). CRC Press, 1998. – 352 с.

24. Bender E. A. An Introduction to Mathematical Modeling (Dover Books on Computer Science). 1-е изд. Dover Publications (Educa Books), 2000. – 272 с.

25. Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С. В. Емельянова. Москва: Машиностроение, 1988. – 520 с.

26. Пепеляев В. А., Черный Ю. М. О современных подходах к оценке достоверности имитационных моделей // Теория имитационного моделирования: труды конференции. Киев, 2003. С. 142–146.

27. Mitchell E. Sisle, Edward D. McCarthy. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile // Simulation. 1982. Т. 39, № 5. С. 159–167.

28. Sayama H. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Paperback, 2015. – 496 с.

29. Xunda Chen, Zanping Jiang, Dongmu Wang, Wenjie Zhang. Hardware-in-the-loop simulation system of Beijing simulation center // Proc. of SPIE Conference on Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing III (13 July 1998).

30. V. N. Maples and G. A. Eastman. “Radar scene simulator”: pat. 4660041. USA. 1987.

31. Тырыкин С. В., Киселёв А. В., Савиных И. С. Замещение сложных радиолокационных объектов малоточечной моделью // Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2002. – 23 с. – Депонирована в ВИНТИ 18.07.2002, № 1357 – В2002.

32. Сонин А. П. Основные тенденции в построении современных и перспективных цифровых устройств формирования помех на основе цифровой радиочастотной памяти DRFM по материалам открытой отечественной и зарубежной печати // Цифровые радиоэлектронные системы (эл. журнал). 2004. № 5.
33. Рисенберг В. Х., Щаренский В. А., Процицкий И. П. Основные принципы построения моделирующих навигационных комплексов // Вопросы кибернетики. Проблемы авиационной и космической кибернетики (интегрированные системы активного управления). 1981. Т. 4. С. 138–151.
34. Бахрак Л. Д., Бенинсон Л. С., Зелкин Е. Г. Справочник по антенной технике: Справ. в 5 т. Москва: ИПРЖР, 1997. Т. 1. – 256 с.
35. Щаренский В. А., Процицкий И. П., Рисенберг В. Х. Полунатурное моделирование радиотехнических информационно-измерительных систем комплекса управления летательных аппаратов с использованием имитаторов // Вопросы кибернетики. Проблемы авиационной и космической кибернетики (интегрированные системы активного управления). 1981. С. 121–131.
36. Миронов В. М. Некоторые вопросы теории проектирования высокоточных имитационных систем РЛС. // Сб. трудов Ленинградского института авиационного приборостроения. — Л., 1968. — вып. 55. — С.151–157.
37. Борзов А. Б., Соколов А. В., Сучков В. Б. Методы цифрового моделирования радиолокационных характеристик сложных объектов на фоне природных и антропогенных образований // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3.
38. Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1 – Москва, «Техносфера», 2014. – 682с.
39. Mahafza В. R. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab. Crc Press, 2018. – 772 с.
40. Фельдман Ю. И., Гидаспов Ю. Б., Гомзин В. Н. Сопровождение движущихся целей /Под ред. Ю. И. Фельдмана. — М.: Сов. радио, 1978. – 288 с.

41. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь. 1982. – 232 с.
42. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М. Радио и связь. 1986. – 184 с.
43. Монаков А. А., Мишура Т. П. Радиолокация протяженных целей: измерение дальности, разрешение и синтез сигналов. Санкт-Петербург: ГУАП, 2012. – 137 с.
44. Delano R., Pfeffer I. Effect of AGS on radar tracking noise // Proc. IRE. 1956. Т. 48. С. 801–810.
45. Губонин Н. С. Флюктуации фазового фронта волны, отраженной от сложной цели // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 11, № 5. С. 844–852.
46. Kulemin G. P. Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter. Boston-London: Artech House, 2003. – 342 с
47. Делано Р. Теория мерцания цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении // Вопросы радиолокационной техники. 1954. Т. 1. С. 108–118.
48. Howard D. Radar target glint in tracking and guidance system based on echo signal phase distortion // Proc. of NEC. 1959. Т. 15. С. 840–849.
49. HUANG Peikang, YIN Hongcheng. Characteristics of Rader Targets // Beijing, Press of Electronic Industry. 2005. С. 157–162.
50. Howard D. Radar target angular scintillation of aircraft // IRE Trans. 1961. Т. AP-9. С. 173–181.
51. Sui M., Xu X. Angular glint calculations and analysis of radar targets via adaptive cross approximation algorithm // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2014. Т. 25, № 3. С. 411–421.
52. Peter J, KAJENSKI. Comparison of two theories of angular glint: polarization considerations // IEEE transaction of Aerospace and Electronic Systems. 2006. Т. 42, № 1. С. 206–210.
53. Канащенков А. И., Меркулов В. И. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т.1. РЛС - информационная основа боевых

действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.

54. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. Москва: Радио и связь, 1981. – 416 с.

55. Ярлыков М. С., Богачев А. С., Меркулов В. И., Дрогалин В. В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т.2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / Под. ред. М.С. Ярлыкова. Радиотехника. Москва, 2012. Т. 2. – 256 с.

56. Справочник по радиолокации / под. ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. В 2 книгах. Книга 2. Москва: Техносфера, 2014. Т. 2. – 680 с.

57. YIN Hongcheng, HUANG Peikang. Methods of Angular Glint of Aircraft Augmentation-A new thchnique of Stealth // Journal of Astronautics. 1994. Т. 20, № 4. С. 80–87.

58. Монаков А. А. Дальномерный шум и критерий протяженности цели по измеряемой координате // РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. Воронеж, 2017. С. 633–641.

59. Лукошкин А. П., Каринский С. С., Шаталов А. А. Обработка сигналов в многоканальных РЛС. Москва: Радио и связь, 1983. – 328 с.

60. Буйлов Е. Н., Горшков С. А. Повышение точности измерения координат кажущегося центра радиолокационной цели в зенитных пушечно-ракетных комплексах // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2016. Т. 102, № 8. С. 94–100.

61. Семин А. И. Радиолокационная математическая модель самолета // Труды ГосНИИАС. 1999. Т. 1. С. 29–34.

62. Киселев А. В. Артюшенко В. В., Никулин А. В. Имитация отражений от распределенных радиолокационных объектов на основе некогерентных геометрических моделей // Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – 211 с.
63. Степанов М. А. Киселев А. В. Моделирование угловых шумов радиолокационных объектов: монография // Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 246 с.
64. Савиных И. С. Требования к параметрам дискретной модели распределенной пассивной помехи // Труды 5 международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск, НГТУ, 2000 г., т. 7, С. 49–52.
65. Бакулев П. А., Джавадов Г. Г., Соколов Д. А. Шумы мерцаний в радиолокации. // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 1991. – №1. – С. 3–10.
66. Архипец Г. А., Киселев А. В. Представление поверхностно-распределенных помех ограниченным числом блестящих точек. // Тр. второй международной научно-технической конференции. Актуальные проблемы приборостроения. (в 7 томах). 1994. Т. 7. С. 31–33.
67. Давидович И. В., Жуковский А. П. Описание сигнала, отраженного от протяженной статистически неровной поверхности, с помощью модели зеркальных точек. // Сб. науч. трудов МЭИ. 1987. Т. 126. С. 22–26.
68. Тырыкин С. В., Киселев А. В. Искажения пеленгационной характеристики при имитации подвижной точечной радиолокационной цели // Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений). 2003. Т. 10. С. 76–80.
69. Никулин А. В., Киселев А. В., Тырыкин С. В. Малоточечная модель протяженного отражающего объекта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. Т. 4, № 25. С. 78–88.
70. Артюшенко В. В., Киселев А. В. Геометрические модели поверхностно-распределенных объектов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2016. № 4. С. 6–11.

71. Тырыкин С. В., Киселев А. В. Экономичный алгоритм имитации сложных радиолокационных целей // Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений). 2003. Т. 4. С. 76–80.
72. United States Patent № 6950057 «Complex radar target simulator», 2005.
73. United States Patent № 5457463 «Radar return signal simulator», 1995.
74. Киселев А. В., Подкопаев А. О., Степанов М. А. Оценка и компенсация систематических ошибок калибровки матричного имитатора // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2018. – № 4. – С. 24–28.
75. Учебно-тренировочное средство: пат. 2126127 РФ.
76. Complex radar target simulator: пат. 6950057 USA.
77. Качалкин М. В. Определение положения фазового центра и конфигураций комбинированной модели радиолокационной цели // Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Радиофизика и радиотехника». 2006. Т. 107.
78. Никулин А., Киселев А., Белоруцкий Р. Алгоритм выбора активных излучателей из матрицы излучателей при моделировании отражений от поверхности Земли // тр. 11 междунар. конф. Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2012). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Т. 4. С. 55–59.
79. Никулин А. В., Киселев А. В., Белоруцкий Р. Ю. Замещение поверхности земли дискретной моделью при имитации радиолокационных эхосигналов от неё // Вопросы радиоэлектроники. Серия Системы отображения информации и управления спецтехникой. 2012. № 4. С. 134–144.
80. Podkopaev A. Density parameters modeling of angle noise probability function / A. Podkopaev ; research adviser M. A. Stepanov, language adviser N. A. Sapchenko // Science. Research. Practice : тез. Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 22 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 133–134.
81. Podkopaev A. O. A Two-Point Partially Coherent Model of the Echoed Signals from Distributed Object Decomposition / A. O. Podkopaev ; research adviser M. A. Stepanov ; language adviser N. A. Sapchenko // Science. Research. Practice : тр.

2 Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 20 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 175–176.

82. Подкопаев А. О. Моделирование параметров плотности распределения вероятностей шумов координат // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 269–274.

83. Киселев А. В., Степанов М. А. Замещение сложного радиолокационного объекта двухточечной моделью. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2019. – № 4. – С. 99–105.

84. 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, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk : NSTU, 2017. – P. 91–93.

85. Kiselev A. V., Sabitov T. I., Stepanov M. A. 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, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk : NSTU, 2017. – P. 131–134.

86. Elizavetin I., Paillou P. The ground surface backscattering modeling using Integral Equation Model // European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen. 1998. С. 153–156.

87. Richards M. A., Scheer J. A., Holm W. A. Principles of Modern Radar: Basic Principles. Scitech Publishing, 2010. – 960 с.

88. Ширман Я. Д., Лещенко С. П., Орленко В. М. О моделировании вторичного излучения воздушных целей и его использовании в технике радиолокационного распознавания // Вестник МГТУ. Серия Приборостроение. 1998. Т. 4. С. 14–24.

89. Ширман Я. Д., Горшков С. А., Лещенко С. П., Орленко В. М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. 1996. № 11.



90. Обнаружение и распознавание объектов радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А. В. Соколова. Москва: Радиотехника, 2006. – 176 с.
91. Knott E. F., Schaeffer J. F., Tuley M. T. Radar cross section. NY: Artech House, 1985. – 510 с.
92. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. Москва: Советское радио, 1975. – 248 с.
93. Варганов М. Е. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. Москва: Радио и связь, 1985. – 232 с.
94. Johnston S. L. Target fluctuation models for radar system design and performance analysis. IEEE Transactions on AES, 1997.
95. Radar moving target simulator: пат. 3114910 USA.
96. Степанов М. А., Киселев А. В., Тырыкин С. В., Белоруцкий Р. Ю. Имитация эхосигналов РСА на основе заранее подготовленного сигнала при отклонении направления и модуля вектора скорости носителя // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 5. С. 7–15.
97. Абатуров В. А., Васильев О. В., Ефимов В. А., Макаев В. Е. Математические модели радиолокационных сигналов, отраженных от воздушных целей различных классов // Радиотехника. 2006. № 7. С. 28–33.
98. Рытов С. М., Кравцов Ю. А. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 464 с.
99. Штагер Е. А. Радиолокационные антиподы кораблей. СПб: ВВМ, 2009. – 197 с.
100. 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.
101. Тырыкин С. В., Киселев А. В. Адекватность моделирования матричным имитатором электромагнитных полей, рассеянных точечной

радиолокационной целью // Материалы Всероссийской конференции «Излучение и рассеяние электро-магнитных волн», Таганрог. 2001. С. 27–31.

102. 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.

103. Тырыкин С. В. Модели радиолокационных объектов, построенные из зависимых отражателей, и имитация эхосигналов на их основе: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 2005. – 24 с.

104. Джавадов Г. Г. Алгоритм классификации шумов мерцания // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-99): Материалы 3-й международной научно-технической конференции, Владимир, 1–5 июня, 1999. ч. 1. Владимир: изд. института оценки природных ресурсов 1999. – С. 258–262.

105. Джавадов Г. Г. Алгоритм классификации радиолокационных целей по структурным признакам // Цифровые радиоэлектронные системы. – 2000.– №3.– С. 54–63.

106. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

107. Бакулев П. А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. Москва: Радио и связь, 1986. – 288 с.

108. Фельдман Ю. И., Мандуровский И. А. Теория флуктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями. Под ред. Ю. И. Фельдмана. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

109. Анфиногенов А. Ю., Школьный Л.А. Моделирование радиолокационных портретов распределенных объектов сложной формы // Радиотехника. 2000. № 3. С. 64–68.

110. Черных М. М., Васильев О. В., Богданов А. В., Савельев А. Н., Макаев В. Е. Экспериментальные исследования информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов // Радиотехника. 2000. № 3. С. 45–54.
111. Канарейкин Л. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. Москва: Советское радио, 1966. – 440 с.
112. Валегура В. А., Валегура В. Ф., Валегура Е. В. Антенна с управляемой поляризацией: пат. 2339130 РФ.
113. 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.
114. Степанов М. А., Белоруцкий Р. Ю., Киселев А. В., Тырыкин С. В. Искажения функции отклика РСА на имитируемый сигнал при дискретной установке задержки // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 32–57.
115. Стайнберг Б. Формирование радиолокационного изображения самолета в диапазоне СВЧ: Пер. с англ. Москва: ТИИЭР, 1988.
116. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / Под ред. В. Ф. Кравченко. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
117. Панов Д. В., Юдин В. А., Караваев С. А. Модели целей, используемые в цифровой имитационной математической модели РЛС дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2009. Т. 8, № 3.
118. Борзов А. Б., Сучков В. Б., Ахияров В. В., Каракулин Ю. В. Математическое моделирование характеристик рассеяния объектов локации с импедансной поверхностью // Журнал радиоэлектроники. 2014. Т. 2.
119. Алексеев А. Г., Штагер Е. А., Козырев С. В. Физические основы технологии STEALTH. СПб: ВВМ, 2007. – 284 с.

120. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны; Под ред. Горяинова В.Т. Москва: Радио и связь, 1988. – 304 с.
121. Морская радиолокация / Под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.
122. Charles Elachi. Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques. New York: IEEE Press, 1987. – 255 с.
123. Артющенко В. В, Киселев А. В., Тырыкин С. В. Использование графических процессов для имитации радиолокационных эхосигналов от поверхности Земли // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Т. 4. С. 37–39.
124. HUANG Peikang, YIN Hongcheng. Angular Glint of Extended Targets // Journal of Systems Engineering and Electronics. 1990. № 12. С. 1–18.
125. Толковый словарь по радиофизике. Основные термины (с эквивалентом на английском языке). Москва: Рус. яз., 1993. – 357 с.
126. Качалкин М. В., Колядов Д. В. Определение положения фазового центра многоточечных моделей радиолокационных целей в случае когерентного отражения // Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Радиофизика и радиотехника». 2006. Т. 107.
127. Качалкин М. В. Определение положения фазового центра и конфигураций комбинированной модели радиолокационной цели // Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Радиофизика и радиотехника». 2006. Т. 107.
128. Тырыкин С. В. Математические модели сложных радиолокационных объектов на основе совокупности зависимых излучателей // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления» - Томск, 2002.
129. Тырыкин С. В. Четырехточечная модель самолета / С. В. Тырыкин // Материалы Российской науч.-техн. конф. «Наука, промышленность, оборона» - Новосибирск, 2002.

130. 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.
131. Степанов М. А. Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2015. № 5. С. 57–67.
132. Li Hua, Zhou Jianjiang, Pan Minhai, Zhao Hanwu. Analysis and Correction of Triad Field Angle Error in Array Radio Frequency Simulation // Future Communication, Computing, Control and Management. 2012. Т. 2. С. 125–134.
133. Guo K., Xiao G., Zhai Y., Sheng X. Angular glint error simulation using attributed scattering center models // IEEE Access. 2018. Т. 6. С. 35194–35205.
134. Степанов М. А., Киселев А. В., Тырыкин С. В., Никулин А.В. Способ имитации радиолокационных отражений: пат. 2610837 РФ.
135. Козлов И. М. Параметры двухточечной статистической модели для имитации сложного радиолокационного объекта. 2000. Т. 5, № Известия вузов. Радиоэлектроника. С. 19–23.
136. Artyushenko V. V., Kiselev A. V. The geometric model of two-dimensional reflective objects // 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). Altay, Erlagol, 2015. С. 107–109.
137. Степанов М. А., Никулин А. В. Замещение распределенного объекта трехточечной геометрической моделью // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 77–85.
138. Никулин А. В. Функция распределения плотности автокорреляции квадратурных составляющих сигналов отражателей поверхностно-распределенного объекта // Труды XII международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". Новосибирск: НГТУ, 2014. Т. 4. С. 31–33.

139. Артющенко В. В., Киселев А. В. Геометрическая модель двумерных отражающих объектов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. 2015. № 3. С. 44–51.

140. Артющенко 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.

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

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

143. Степанов М. А., Артющенко 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.

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

145. Киселев А. В., Орешкина М. В. Имитация радиолокационных эхосигналов от неоднородной земной поверхности // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. – 2017. – № 4. – С. 24–27.

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

147. 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. Т. 2. С. 274–279.

148. Киселев А. В., Сабитов Т. И., Степанов М. А. Двумерная частично когерентная геометрическая модель распределенного радиолокационного объекта. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2020. – № 1-2 (46-47). – С. 28–36.

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

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

151. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. Советское радио, 1971. – 328 с.

152. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). 4-е изд. Москва: Издательство «Наука», 1978. – 832 с.

153. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва: Советское радио, 1966. Т. 1. – 728 с.

154. 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.

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

156. 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.

157. 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.

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

159. Podkopyayev A. O. A Two-Point Partially Coherent Model of the Echoed Signals from Distributed Object Decomposition / A. O. Podkopyayev ; research adviser M. A. Stepanov ; language adviser N. A. Sapchenko // Science. Research. Practice : тр. 2 Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 20 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 175–176.

160. 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 координат // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. - 2019. – № 4. – С. 16–21.

161. Савиных И. С., Киселев А. В. Влияние турбулентности атмосферы на вероятностные характеристики обнаружения цели на фоне атмосферных пассивных помех // Радиоэлектроника – 2003, № 3. – С. 18–23 (Изв. высш. учеб. заведений).

162. Савиных И. С. Моделирование доплеровского спектра эхосигнала от объемно-распределенных радиолокационных объектов // Тр. Региональной научно-технической Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиотехники», Новосибирск, НГТУ, 2003., С. 40–43.

163. Савиных И. С. Моделирование доплеровского спектра эхосигнала от объемно-распределенного объекта при ламинарном движении отражающих частиц // Материалы шестой междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, НГТУ, 2002., т. 4., С. 59–61.



164. Савиных И. С. Вероятностные характеристики координат цели, визируемой на фоне распределенной пассивной помехи, при моделировании цели набором дискретных отражателей. / И. С. Савиных // Сб. научных трудов НГТУ, Новосибирск, НГТУ, 2001. – № 1 (23)., С. 70–75.
165. Степанов М. А., Киселев А. В. Влияние турбулентности атмосферы на характеристики обнаружения РЛС с СДЦ // Изв. ВУЗов Радиоэлектроника. 2005. № 12. С. 46–51.
166. 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. T. 48, № 12. С. 33–37.
167. Монаков А. А., Островитянов Р. В., Храмченко Г. К. Оценка положения энергетического центра протяженного объекта по зависимой выборке // Радиотехника. 1998. № 1. С. 19–23.
168. Атмосфера. Справочник / Л.: Гидрометеиздат. 1991. – 508 с.
169. Rauber R. M., Nesbitt S. W. Radar Meteorology: A First Course. Wiley Blackwell, 2018. – 488p.
170. Мазин И. П., Шметер С. М. Облака: строение и физика образования // Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 279 с.
171. Шакина Н. П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов // Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 263 с.
172. Малачин Ю. И. Математическое моделирование многомерных случайных полей на основе параметрических представлений // Радиотехника и электроника. 1983, №4, С. 709–718.
173. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва: Советское радио, 1968. Т. 2. 504 с.
174. Fukao S, Hamazu K. Radar for Meteorological and Atmospheric Observations // Springer Japan. Japan, – 537p. (in English)
175. Киселев А. В., Степанов М. А. Оценка характеристик обнаружения РЛС с СДЦ при турбулентной атмосфере // Изв. ВУЗов «Радиоэлектроника» 2007. - №8 (т.50), С. 35 – 40.

176. Stepanov M. A. Signal reception characteristics estimation of radar with moving-target indication in case of turbulent atmosphere // Radioelectronics and communications systems, vol 50, No50.

177. Podkopayev 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.

178. Podkopayev 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.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель  
генерального директора –  
генеральный конструктор  
А. И. Живец  
И.А. Зверев  
2021



УТВЕРЖДАЮ

Проректор НГТУ по научной  
работе  
С.В. Брованов  
2021



АКТ

О внедрении научных результатов диссертационной работы Подкопаева А.О.

Мы, представители АО «ЗАСЛОН» в лице первого заместителя генерального директора – генерального конструктора А.И. Живца, начальника отделения А.Л. Лободы, начальника лаборатории А.Н. Бызова, ст.н.с. М.Б. Рыжикова и представители Новосибирского государственного технического университета в лице проректора по научной работе, доцента С.В. Брованова, руководителя темы № 1820187224062452208002088/РТУ-10-19, профессора каф. РПиРПУ А.В. Киселева составили настоящий акт об использовании научных результатов диссертационной работы Подкопаева Артемия Олеговича.

Использование результатов диссертационной работы проходило в рамках хоздоговора № 1820187224062452208002088/РТУ-10-19 от 25.11.2019 г. между АО «ЗАСЛОН» и НГТУ.

Подкопаевым А.О. выполнено теоретическое обоснование применимости четырехточечных частично когерентных геометрических моделей для имитации объемно-распределенных объектов. На его основе было разработано программное обеспечение имитатора, предназначенного для полунатурной отработки перспективных радиолокационных средств (в части имитации отражений от метеорологических объектов).

От АО «ЗАСЛОН»:

Начальник отделения  
А. Л. Лобода

От НГТУ:

Руководитель темы №  
1820187224062452208002088/РТУ-  
10-19, проф. кафедры РПиРПУ  
А.В. Киселев

Начальник лаборатории  
А.Н. Бызов

Старший научный сотрудник  
М.Б. Рыжиков