

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Новосибирский государственный технический университет

На правах рукописи



Артюшенко Вадим Валерьевич

Имитация отражений от поверхностно-распределенных объектов на
основе некогерентных геометрических моделей

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор Киселев А.В.

Томск – 2017

ВВЕДЕНИЕ	4
1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	16
1.1. Свойства и характеристики отражений от распределенных объектов	16
1.2. Методы имитации отражений от распределенных объектов.....	26
1.3. Заключение по первому разделу	37
2. МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ШУМОВ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	39
2.1. Известные геометрические модели.....	40
2.2. Иные конфигурации двумерных геометрических моделей.....	51
2.2.1. Четырехточечная модель	51
2.2.2. Четырехточечная модель с инвариантными свойствами	55
2.2.3. Пятиточечная модель	56
2.2.4. Пятиточечная модель с инвариантными свойствами	64
2.2.5. Девятиточечная модель	66
2.2.6. Девятиточечная модель с инвариантными свойствами	70
2.3. Условия инвариантности конфигурации двумерной N-точечной модели к углу визирования.....	73
2.5. Выводы по второму разделу	77
3. МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	79
3.1. Спектральный подход к синтезу моделей распределенных объектов ..	79
3.2. Декомпозиция сложного распределенного объекта.....	86
3.3. Случай разделимости пространственной и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ объекта	90
3.4. Синтез моделей для типовых ситуаций при имитации.....	94
3.4.1. Модели объектов, $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ которых допускают разделимость пространственных и временной переменных.....	96

3.4.2. Модели объектов, $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ которых не допускают разделимость пространственных и временной переменных.....	99
3.5. Выводы по третьему разделу.....	106
4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ	108
4.1. Описание свойств отражений от земной поверхности	108
4.2. Алгоритм синтеза геометрических моделей, определяющих отражающие свойства земной поверхности.....	114
4.3. Алгоритм имитации отражений от поверхности Земли на основе двумерных некогерентных геометрических моделей	119
4.4. Обобщенный алгоритм синтеза геометрических моделей и имитации отраженных сигналов	132
4.5. Заключение по четвертому разделу	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
ЛИТЕРАТУРА	141
ПРИЛОЖЕНИЕ	155

ВВЕДЕНИЕ

Обязательным этапом разработки современных радиолокационных систем (РЛС) является полунатурное моделирование [1-7]. Объясняется это тем, что проведение натуральных испытаний во многих случаях сопровождается огромными материальными и временными затратами. Кроме того, на ранних стадиях разработки системы проведение натуральных экспериментов попросту невозможно.

При проведении полунатурных испытаний реальные условия работы РЛС (совокупность сигналов и помех на ее входе и т.д.) воспроизводятся с помощью специализированных программно-аппаратных комплексов, получивших название имитаторов эхосигналов [1-2, 4-5, 8-12]. При этом один или несколько узлов РЛС (например, антенна, блок цифровой обработки сигналов и т.д.) могут быть заменены математическими моделями. Использование комплексных испытательных стендов позволяет исследовать поведение отдельных блоков РЛС в различных режимах работы, оценить показатели технической эффективности системы в целом, а также определить рациональные методы натуральных испытаний и технически обоснованно решить основные вопросы эксплуатации РЛС [1-2].

Особый интерес представляют имитационные комплексы, способные работать в реальном масштабе времени (РМВ). Очевидно, что при этом имитатор должен использовать математические модели объектов, требующие минимум ресурсов для вычисления отсчетов имитируемого сигнала. Естественно, необходимо также обеспечить достоверность результатов моделирования. Если для точечных объектов задача синтеза таких моделей во многом решена [13-15], то поиск адекватных и экономичных моделей поверхностно- и объемно-распределенных объектов является по-прежнему актуальной задачей.

Таким образом, модель поверхностно-распределенного объекта должна удовлетворять требованиям экономичности и адекватности. Под требованием

экономичности математической модели подразумевается два важных аспекта. Во-первых, модель должна обеспечивать минимальный объем вычислений, необходимый для имитации в РМВ. Во-вторых, модель должна быть по возможности универсальной к условиям эксперимента, что также позволяет уменьшить объем вычислений. Например, во многих случаях важно, чтобы конфигурация модели сохранялась при смене угла визирования замещаемого объекта.

Сложность задачи моделирования отражений распределенных объектов, обусловлена тем, что такой объект состоит из совокупности большого количества отражающих элементов, каждый из которых характеризуется комплексным коэффициентом отражения. В результате, суммарный отраженный сигнал является случайным. Можно считать, что сигналы отдельных отражателей являются статистически независимыми. Кроме того, в результате интерференции волн от элементарных отражателей в точке приема возникают флуктуации фазового фронта суммарной отраженной волны, что приводит к ошибкам определения угловых координат объектов. Такое явление получило название шумов угловых координат (ШК). Практически во всех задачах, связанных с измерением угловых координат объектов они в большей или меньшей степени есть. Например, при определении угловых координат: самолета на фоне тучи (без использования селекции движущихся целей); наземных объектов; цели в ближнем воздушном бою; определении высоты препятствий в режиме маловысотного полета и во многих других задачах. Нет сомнений в том, что достоверная имитация отражений от распределенных объектов должна учитывать это явление. Для описания ШК используются плотность распределения вероятностей (ПРВ) и корреляционная функция.

Для моделирования отражений от распределенных объектов получили распространение геометрические модели. Основная идея при этом заключается в представлении моделируемого объекта в качестве

совокупности статистически независимых отражателей, распределенных в области пространства, ограниченной размерами моделируемого объекта. Исследованием геометрических моделей в разное время занимались Delano R., Beard C., Островитянов Р.В., Басалов Ф.А., Монаков А.А. и др. [16-23]. Вполне очевидно, что реализация многоточечной модели для реальных объектов сложна, поскольку для обеспечения высокой точности моделирования требуется большое количество отражателей (до $10^6 - 10^7$ для подстилающей поверхности, метеообразований и т.д. [24-25]).

Как известно [13, 16], модель поверхностно-распределенного объекта является адекватной, если она позволяет с заданной точностью моделировать:

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

Очевидным способом решения проблемы является сокращение числа отражателей, составляющих модель объекта. Модели, замещающие объект набором небольшого числа независимых точечных излучателей, получили название малоточечных геометрических моделей. Для сложных точечных отражающих объектов методы синтеза таких моделей разработаны в [26-29]. Показано, что возможно замещение сложных точечных объектов, образованных сколь угодно большим числом отражающих элементов, геометрической моделью из $2 \div 8$ точечных излучателей, формирующих взаимозависимые сигналы.

Для имитации отражений распределенных объектов получили распространение модели, сигналы излучателей которых представляют собой некоррелированные узкополосные случайные процессы с нормальным распределением мгновенных значений [16-17, 30-38]. Большой практический интерес к этим моделям обусловлен тем, что получающиеся в этом случае

характеристики сигналов и ШК соответствуют имеющим место при отражениях от распределенных объектов [13, 16, 21-23, 29-38]. Далее будем называть такие модели некогерентными. На сегодняшний день исследованы некогерентные модели, содержащие N отражателей, расположенных в линию [19-38]. Разработанные модели позволяют имитировать отражения объектов, распределенных вдоль одного направления визирования (по азимуту или углу места). Вопросы, связанные с синтезом двумерных некогерентных моделей поверхностно-распределенных объектов, до настоящего времени не рассматривались, что и определило цель данной работы.

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

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

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

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

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

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований и одного

приложения. Текст диссертации изложен на 155 страницах, содержит 26 рисунков и 4 таблицы.

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

Показано, что при имитации отражений от распределенных объектов актуален вопрос сокращения количества точек некогерентных геометрических моделей при сохранении адекватности моделирования. При этом вопросы, касающиеся методов синтеза двумерных малоточечных некогерентных геометрических моделей, в литературе не рассматривались.

Показано, что существующий традиционный подход к заданию отражающих свойств распределенных объектов требует избыточных вычислительных затрат при моделировании ШК. Предложен иной способ задания отражающих свойств объекта через характеристики распределения ШК. Суть этого способа состоит в декомпозиции поверхностно-распределенного объекта на фрагменты с последующим замещением каждого из них геометрической моделью.

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

Второй и третий разделы посвящены исследованию вопросов синтеза двумерных малоточечных некогерентных моделей, позволяющих адекватно моделировать вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики ШК поверхностно-распределенных объектов.

Во **втором разделе** решены вопросы, связанные с обеспечением адекватности моделирования вероятностных характеристик ШК поверхностно-распределенных объектов.

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

модели не позволяют решить задачу обеспечения инвариантной к углу визирования конфигурации модели.

Показано, что увеличение числа излучателей модели до четырех, позволяет обеспечить заданную ПРВ ШК по двум угловым координатам. Однако модель допускает независимую установку по двум ортогональным осям только одного из параметров распределения ШК (либо центра распределения, либо его эффективной «ширины»). Такая модель при визировании вдоль координатных осей сводится к двухточечной, а, следовательно, не позволяет независимо управлять параметрами ПРВ ШК, относящиеся к этому направлению визирования.

Доказано, что модели, содержащие пять и девять излучателей, расположенных на плоскости, допускают независимую установку обоих параметров распределения ШК по двум угловым координатам. Это позволяет независимо устанавливать положение центра и угловые размеры моделируемого объекта по двум угловым координатам. Для модели с пятью излучателями мощность сигнала, подводимого к центральному излучателю, оказывает влияние на параметры ПРВ ШК по обеим координатам. В результате возникает ограничение на область независимого управления этими параметрами. Девятиточечная модель позволяет полностью «развязать» параметры ПРВ ШК, относящиеся к двум угловым координатам.

Доказано, что рассмотренные модели с 4, 5 и 9 излучателями при выполнении ряда условий имеют инвариантные к азимутальному углу визирования параметры распределения ШК.

Получены условия, гарантирующие инвариантность геометрии для произвольной N-точечной конфигурации излучателей двумерной геометрической модели к углу визирования. Условия сводятся к расположению излучателей модели в виде правильного многоугольника. При этом мощности сигналов, подаваемых на излучатели, должны быть равными (за исключением, в некоторых случаях центрального излучателя).

Получены аналитические соотношения, позволяющие по функции распределения плотности интенсивности сигналов элементарных отражателей имитируемого объекта синтезировать модели, обеспечивающие заданные ПРВ ШК относительно двух угловых координат, а также модели, геометрия которых инвариантна к смене угла визирования.

В третьем разделе решены вопросы, связанные с адекватным моделированием спектрально-корреляционных характеристик ШК поверхностно-распределенных объектов.

Предложен спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов. Этот подход позволяет по спектральным характеристикам эхосигналов от точек имитируемого объекта определить параметры сигналов, которые следует подать на излучатели геометрической модели для обеспечения достоверного моделирования.

Доказана правомерность применения принципа декомпозиции при имитации ШК распределенного объекта. Этот принцип утверждает следующее: достоверное моделирование по выбранному критерию ШК отдельных фрагментов распределенного объекта гарантирует достоверное моделирование ШК всего объекта в целом.

Отдельно был проанализирован случай делимости пространственных и временной переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции по поверхности имитируемого объекта. Показано, что в этом случае достоверная имитация ШК сводится к обеспечению равенства параметров ПРВ ШК для геометрической модели и имитируемого объекта. При этом к излучателям геометрической модели следует подводить сигналы с корреляционными функциями пропорциональными корреляционным функциям эхосигнала от замещаемого объекта.

В заключении раздела приведена классификация двумерных моделей распределенных объектов. Получены соотношения для определения СПМ

сигналов, подводимых к излучателям рассмотренных геометрических моделей, как в случае наличия разделимости переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции по поверхности объекта, так и при ее отсутствии.

Четвертый раздел посвящен развитию полученных в разделах 2 и 3 теоретических результатов в направлении их практического использования для синтеза моделей поверхностно-распределенных объектов, а также их проверке.

Предложен обобщенный алгоритм синтеза геометрических моделей поверхностно-распределенного объекта, а также обобщенный алгоритм имитации эхосигналов на их основе.

На примере имитации эхосигнала от поверхности Земли проведена апробация предложенного обобщенного алгоритма. В качестве исходных данных использована цифровая топографическая карта местности с заданными значениями УЭПР и ширины спектра доплеровских флуктуаций отдельных покровов поверхности. На их основе синтезируются геометрические модели и рассчитываются отсчеты эхосигналов.

Выполнена проверка достоверности алгоритма имитации путем математического моделирования процесса обработки сигналов РЛС методом амплитудной моноимпульсной пеленгации.

На основе обобщенного алгоритма имитации разработано программное обеспечение имитатора эхосигналов и помех, используемого в составе тренажера радиотехнической системы. Программное обеспечение позволяет по цифровой карте поверхности и дополнительным параметрам моделируемой ситуации синтезировать совокупность замещающих двумерных моделей и вычислить отсчеты имитируемого эхосигнала.

В заключении приведены основные результаты работы.

В приложении приведен акт о внедрении основных результатов работы.

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

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

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

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

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

3. Адекватное моделирование шумов угловых координат фрагментов, составляющих поверхность распределенного объекта, гарантирует адекватное моделирование шумов угловых координат всего объекта в целом. В частности, при разбиении объекта на фрагменты,

выделенные по линиям равных частот, для адекватного моделирования шумов угловых координат достаточно обеспечить требуемые параметры функции распределения шумов угловых координат на каждой частоте спектра имитируемого сигнала.

Научная новизна работы

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

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

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

Практическая ценность работы

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

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

2. При расположении излучателей модели в виде правильного многоугольника и равной мощности их сигналов, можно синтезировать

инвариантную к углу визирования геометрическую модель поверхностно-распределенного объекта. Это позволяет при имитации отражений от поверхностно-распределенного объекта экономить вычислительные ресурсы, поскольку не требуется изменять геометрическую конфигурацию модели.

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

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

Реализация и внедрение результатов исследования

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

Апробация работы

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

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

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

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Задачи данного раздела можно сформулировать следующим образом:

1. Проанализировать основные свойства и характеристики отражений от распределенных объектов и используемые критерии достоверности их моделирования.
2. Проанализировать известные модели и методы, используемые для имитации отражений распределенных объектов, а также алгоритмы и устройства на их основе.
3. Исходя из нерешенных до настоящего времени вопросов, сформулировать цели и основные задачи исследования.

1.1. Свойства и характеристики отражений от распределенных объектов

Цель подраздела – проанализировать основные свойства и характеристики отражений от распределенных объектов и сформулировать критерии адекватности их моделирования.

Известно, что все отражающие (рассеивающие) объекты можно разделить на сосредоточенные и распределенные [13]. К сосредоточенным относят объекты, размеры которых не превышают объем, который разрешается РЛС.

В целом вопросы описания отражений от сосредоточенных объектов изучены достаточно полно [13, 24, 41-43]. Известна обширная литература, касающаяся моделей сигналов, отраженных сосредоточенными объектами, методов и алгоритмов синтеза таких моделей, а также устройств имитации на их основе [13, 44].

Под распределенным объектом понимается совокупность множества элементов, заполняющих определенный объем или участок поверхности, размеры которых превышают размеры элемента разрешения РЛС (разрешаемую площадь или разрешаемый объем). В соответствии с этим принято делить распределенные объекты на поверхностные (например, земная и водная поверхность) и объемные (дождь, снег, туман, атмосферные неоднородности, облака искусственных металлизированных рассеивателей и др.). Отражения от распределенных объектов оказывают влияние на работу многих радиотехнических устройств, выступая как в качестве помех, так и источников полезной информации [13-14, 45-50].

Существует также иной подход к разделению объектов на сосредоточенные и распределенные, основанный на погрешности измерений. В частности, авторы [16] предлагают считать объект распределенным, если ошибки измерения его координат, вызванные протяженностью, превосходят аппаратные ошибки. Указанное определение, хотя и не вызывает возражений, с трудом может использоваться на практике из-за многозначности терминов «ошибки радиолокационных измерений» и «аппаратные ошибки», а также разнообразия критериев их сравнения. Поэтому далее будем пользоваться более простым определением, основанным на сравнении размеров объекта и элемента разрешения.

Любой распределенный объект можно представить совокупностью элементарных рассеивателей, расположенных в пространстве. Число рассеивателей, как правило, велико, а величина вклада в общий отраженный сигнал является случайной и зависит от пространственной структуры объекта и угла визирования этого объекта, который непрерывно изменяется при движении РЛС и самого объекта. В силу указанных факторов амплитуда и фаза элементарных электромагнитных волн, отраженных распределенным объектом, являются случайными величинами. Кроме того, под влиянием ряда причин, таких как движение элементарных рассеивателей под действием

ветра, движения РЛС, сканирования антенны в точке приема случайным образом изменяется соотношение амплитуд и фаз элементарных волн, что приводит к появлению специфических флуктуаций суммарного отраженного сигнала, а также фазового фронта суммарной отраженной волны.

Сигналы, отраженные от распределенных объектов, характеризуются плотностью распределения вероятностей мгновенных значений, а также спектрально-корреляционными характеристиками [13, 39, 51]. Традиционно отражающие свойства самого распределенного объекта принято характеризовать с помощью средней удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) [50].

Пусть РЛС излучает узкополосный зондирующий сигнал с комплексной огибающей $U_0(t)$ и несущей частотой ω_0 . Интенсивность облучения для каждого направления (угол по азимуту θ , угол места ψ) определяется диаграммой направленности передающей антенны (ДНА) РЛС – $F_1(\theta, \psi)$. При отражении от каждого элементарного отражателя объекта зондирующий сигнал претерпевает следующие изменения.

1. Получает случайный фазовый сдвиг, обусловленный случайной фазой комплексного коэффициента отражения.

2. Смещается по частоте на величину пропорциональную проекции вектора взаимной скорости отражателя и РЛС на направление визирования этого отражателя из точки, соответствующую фазовому центру антенны РЛС.

3. Интенсивность сигнала меняется пропорционально УЭПР объекта.

Обозначим $A_{i,j,k}$, $\omega_{i,j,k}$, $\varphi_{i,j,k}$ соответственно амплитуду, частоту и фазу сигнала, отраженного от i -, j -, k -го отражателя объекта. Отраженный сигнал от всего объекта представляет собою сумму сигналов, отраженных от каждого элементарного отражателя. Амплитуда принятого сигнала

определяется диаграммой направленности приемной антенны РЛС – $F_2(\theta, \psi)$. В результате сигнал на выходе приемной антенны РЛС [44]:

$$\dot{u}(t) = \sum_{i,j,k=1}^{I,J,K} A_{i,j,k} \dot{U}_0(t - \tau_{i,j,k}) F_1(\theta_{i,j,k}, \psi_{i,j,k}) F_2(\theta_{i,j,k}, \psi_{i,j,k}) \times \exp(j(\omega_0 + \omega_{i,j,k}) \cdot t + j\phi_{i,j,k}), \quad (1.1)$$

где $\theta_{i,j,k}$, $\psi_{i,j,k}$, $\tau_{i,j,k}$ – положение i -, j -, k – го отражателя по азимуту, углу места и задержке соответственно; I , J , K – количество отражателей по соответствующим координатам.

В результате указанных преобразований принятый сигнал значительно отличается от зондирующего. Из выражения (1.1) очевидно, что при больших значениях I , J , K мгновенное значение такого сигнала будет случайным.

В силу центральной предельной теоремы распределение мгновенных значений такого сигнала является всегда гауссовским, а, следовательно, для его описания, кроме плотности распределения вероятностей мгновенных значений, достаточно использовать корреляционную функцию или спектральную плотность мощности (СПМ) [51].

СПМ отраженного сигнала, пришедшего на вход приемника РЛС в момент времени t_0 , представляет собой свертку мгновенной СПМ доплеровских флуктуаций ($G_D(\omega, t_0)$) и энергетического спектра зондирующего сигнала [14-15, 45, 51]:

$$G(\omega, t_0) = G_D(\omega, t_0) \otimes |S(\omega)|^2, \quad (1.2)$$

где $|S(\omega)|$ – амплитудный спектр зондирующего сигнала, \otimes – знак операции свертки.

СПМ доплеровских флуктуаций:

$$G_D(\omega, t_0) \sim \sum_{i,j,k=1}^{I,J,K} F_1^2(\theta_{i,j,k}, \psi_{i,j,k}) F_2^2(\theta_{i,j,k}, \psi_{i,j,k}) \times \\ \times \delta\left(f + \frac{2}{\lambda} \vec{v}_{i,j,k} \bullet \vec{r}_{i,j,k}\right), \quad (1.3)$$

где $\vec{v}_{i,j,k}$ – вектор скорости i -, j -, k -го отражателя в рассматриваемый момент времени, $\vec{r}_{i,j,k}$ – радиус-вектор, определяющий направление визирования i -, j -, k -го отражателя, λ , f – длины волны и соответствующая ей частота зондирующего сигнала, \bullet – знак скалярного произведения.

Спектр доплеровских флуктуаций $G_D(\omega, t_0)$ зависит от момента времени t_0 , поэтому о нем говорят как о мгновенной спектральной плотности. Параметры и форма $G_D(\omega, t_0)$ сильно зависят от направления и формы ДН приемной и передающей антенн, частоты, длительности и других параметров зондирующего сигнала, скорости и направления движения РЛС, а также от отражающей способности и положения отражателей.

На практике для описания доплеровских спектров используется ряд упрощенных моделей [13]. Все они предполагают то, что рассматриваемый объект является статистически однородным. Под статистически однородным объектом понимается такой, отражающие свойства которого не изменяются в пределах объекта и определяются только направлением облучения РЛС.

Степенная модель:

$$G(f) = G_0 \left(1 + \left(\frac{f - f_0}{f_c} \right)^n \right)^{-1}. \quad (1.4)$$

Гауссовская модель:

$$G(f) = G_0 \exp\left(-\frac{(f - f_0)^2}{2\sigma_f^2}\right). \quad (1.5)$$

Экспоненциальная модель:

$$G(f) = G_0 \exp(-\beta|f - f_0|), \quad (1.6)$$

где параметр f_0 отвечает за положение центра СПМ, параметры f_c , σ_f^2 , β определяют ширину СПМ. Параметр n определяет порядок степенной модели.

Особенности сигналов, отраженных от различных поверхностно-распределенных объектов (в частности, земной поверхности и поверхности моря) исследовались такими авторами как Skolnik M. [13, 52], Nathanson F. [53], Long M. [39], Barrick D. [40] и рядом других авторов [1,13, 54-65].

Распределенным объектам присуще такое интересное свойство как шумы угловых координат.

Физический смысл этого явления в следующем.

Поскольку направление на объект РЛС определяет по нормали к фазовому фронту, который при отражении от распределенного объекта флуктуирует, то будет определено направление не на действительный, а на так называемый кажущийся центр излучения (КЦИ) объекта, положение которого будет также флуктуировать. Указанные флуктуации и получили название шумов угловых координат (также – угловых шумов) распределенного объекта. Термин прямо указывает на место возникновения флуктуаций – это сам объект, а не система его радиолокационного сопровождения. Здесь и далее под ШК понимаются ошибки определения угловых координат объектов (азимутального угла и угла места). Однако, как указано в [16], угловые шумы и шумы дальности имеют общую физическую природу, следовательно, большая часть полученных результатов будет справедлива и для дальномерного шума.

Под КЦИ поверхностно-распределенного объекта будем понимать точку на поверхности этого объекта, на положение которой в текущий момент времени указывает направление вектора противоположного нормали к фазовому фронту в точке приема.

Величина ШК является принципиальным моментом, отличающим отражения от распределенных и сосредоточенных объектов. Следовательно, достоверное моделирование отражений от распределенных объектов должно учитывать ШК.

Изучением статистических характеристик ШК занимались многие отечественные и зарубежные ученые, такие как Островитянов Р.В., Басалов Ф.А., Губонин Н.С., Варшавчик М.Л., Howard D.D., Delano R.H., Pfeiffer I., Dunn J.H., Allen P.J. [16-20, 66-69]. Пожалуй, наиболее глубокое исследование и систематизация полученных результатов проведены советскими учеными Островитяновым Р.В. и Басаловым Ф.А. [16].

В литературе [13, 16, 66-70] получены выражения, определяющие ПРВ и корреляционную функцию мгновенного значения положения КЦИ.

Выражение, описывающее ПРВ ШК приведено в работах [16, 71]:

$$W(\Delta\gamma) = \frac{\mu_\gamma}{2 \cdot (1 + \mu_\gamma^2 \cdot (\Delta\gamma)^2)^{3/2}}, \quad (1.7)$$

где $\Delta\gamma = \gamma - m_\gamma$ – мгновенное значение отклонения КЦИ по обобщённой координате γ от математического ожидания m_γ , μ_γ – параметр, определяющий эффективную «ширину» распределения.

Физический смысл параметров распределения (1.7) в следующем: m_γ – определяет положение центра распределенного объекта, а μ_γ^{-1} – его протяженность вдоль координаты γ .

Несмотря на то, что ПРВ ШК не является гауссовой, для описания ШК традиционно принято использовать ПРВ и корреляционную функцию [13, 16].

Параметры ПРВ (1.4) для любого распределенного объекта могут быть определены если задано распределение по объему рассматриваемого объекта плотности интенсивности сигналов его элементарных отражателей [16]. Обозначим эту функцию $F_r(x, y, z)$, где x, y, z - координаты правой декартовой системы координат, центр которой может быть расположен в любой точке объекта (при визировании объекта вдоль одной из осей в выражении (1.7) обобщенную координату γ следует заменить на соответствующую координату). В [16] эта функция введена следующим образом:

$$F_r(x_i, y_j, z_k) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = \langle u_{i,j,k}^2 \rangle = \langle v_{i,j,k}^2 \rangle, \quad (1.8)$$

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

По заданной $F_r(x, y, z)$ параметры распределения (1.7) можно определить следующим образом [16]:

$$m_\gamma = \frac{\int \gamma F_r(\gamma) d\gamma}{\int F_r(\gamma) d\gamma}, \quad (1.9)$$

$$\mu_\gamma = \frac{\sigma_H}{\sigma_B}, \quad (1.10)$$

$$\sigma_H^2 = \int F_r(\gamma) d\gamma, \quad (1.11)$$

$$\sigma_B^2 = \int_{\gamma} (\gamma - m_{\gamma})^2 F_r(\gamma) d\gamma, \quad (1.12)$$

где в целях упрощения записи $F_r(x, y, z) \rightarrow F_r(\gamma)$, интегрирование ведется по соответствующей выбранной координате из x, y, z .

Если в правой части выражения (1.8) перейти к автокорреляционным функциям квадратурных компонент эхосигнала i -, j -, k -го отражателя, то можно ввести понятие функции распределения плотности автокорреляции квадратурных компонент сигналов отражателей по объему объекта:

$$F_r(x_i, y_j, z_k, \tau) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = \langle u_{i,j,k}(t) u_{i,j,k}(t + \tau) \rangle = \langle v_{i,j,k}(t) v_{i,j,k}(t + \tau) \rangle. \quad (1.13)$$

Аналогично, переходя к взаимно корреляционным функциям квадратурных компонент сигнала i -, j -, k -го отражателя, можно определить функцию распределения плотности взаимной корреляции квадратурных компонент сигналов отражателей по объему объекта:

$$F_s(x_i, y_j, z_k, \tau) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = \langle u_{i,j,k}(t) v_{i,j,k}(t + \tau) \rangle = -\langle v_{i,j,k}(t) u_{i,j,k}(t + \tau) \rangle. \quad (1.14)$$

Исходя из такого определения, функция распределения по объему объекта плотности интенсивности сигналов его элементарных отражателей $F_r(x, y, z)$ будет частным случаем функции распределения плотности автокорреляции при $\tau = 0$, т.е. $F_r(x, y, z) = F_r(x, y, z, 0)$; при этом функция $F_s(x, y, z, 0) = 0$.

Общее выражение для корреляционной функции ШК распределенного объекта получено в работах [16, 72]:

$$B_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{\mu^2} \left[\frac{a_1(\tau) a_3(\tau) \cos(\eta_1(\tau) - \eta_3(\tau)) - a_2(\tau)^2 \cos(2(\eta_1(\tau) - \eta_2(\tau)))}{a_1(\tau)^2} \right] \times \quad (1.15)$$

$$\times \ln \left[\frac{1}{\sqrt{1 - a_1(\tau)^2}} + \frac{a_2(\tau)^2 \cos(2(\eta_1(\tau) - \eta_2(\tau)))}{1 - a_1(\tau)^2} \right],$$

где

$$a_1(\tau) = \sqrt{r_H(\tau)^2 + s_H(\tau)^2}; \quad a_2(\tau) = \sqrt{r_{BH}(\tau)^2 + s_{BH}(\tau)^2}; \quad a_3(\tau) = \sqrt{r_B(\tau)^2 + s_B(\tau)^2}$$

$$\eta_1(\tau) = \arctg \left(\frac{s_H(\tau)}{r_H(\tau)} \right); \quad \eta_2(\tau) = \arctg \left(\frac{s_{BH}(\tau)}{r_{BH}(\tau)} \right); \quad \eta_3(\tau) = \arctg \left(\frac{s_B(\tau)}{r_B(\tau)} \right);$$

$$r_H(\tau) = \frac{1}{\sigma_H^2} \int_{\gamma} F_r(\gamma, \tau) d\gamma; \quad (1.16)$$

$$s_H(\tau) = \frac{1}{\sigma_H^2} \int_{\gamma} F_s(\gamma, \tau) d\gamma; \quad (1.17)$$

$$r_{BH}(\tau) = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \int_{\gamma} (\gamma - m_{\gamma}) F_r(\gamma, \tau) d\gamma; \quad (1.18)$$

$$s_{BH}(\tau) = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \int_{\gamma} (\gamma - m_{\gamma}) F_s(\gamma, \tau) d\gamma; \quad (1.19)$$

$$r_B(\tau) = \frac{1}{\sigma_B^2} \int_{\gamma} (\gamma - m_{\gamma})^2 F_r(\gamma, \tau) d\gamma; \quad (1.20)$$

$$s_B(\tau) = \frac{1}{\sigma_B^2} \int_{\gamma} (\gamma - m_{\gamma})^2 F_s(\gamma, \tau) d\gamma \quad (1.21)$$

Величины $r_H(\tau)$, $r_B(\tau)$, $r_{BH}(\tau)$, $s_H(\tau)$, $s_B(\tau)$, $s_{BH}(\tau)$ имеют смысл коэффициентов корреляции и зависят от физической структуры объекта и характера его движения [16].

Выражение (1.15) получено исходя из предположения о том, что распределенный объект может быть представлен совокупностью большого числа статистически независимых отражателей, заполняющих область пространства, ограниченную размерами этого объекта.

На основании всего вышеизложенного сформулируем **критерии достоверного моделирования отражений** от распределённых объектов.

Очевидно их можно разбить на две группы, касающиеся временных характеристик и спектрально-корреляционных характеристик сигнала и шумов координат.

Рассмотрим временные характеристики. Для достоверного моделирования отражений необходимо обеспечить нормальное распределение мгновенных значений сигнала. Кроме того, достоверная модель объекта должна обеспечивать ПРВ ШК (1.7) с параметрами m_γ и μ_γ , равными параметрам распределения ШК от замещаемого объекта.

Кроме того, достоверное моделирование должно включать воспроизведение спектров доплеровских флуктуаций от имитируемого объекта. Равенство спектрально-корреляционных характеристик ШК для модели и имитируемого объекта обеспечивается при равенстве следующих параметров: m_γ , σ_H^2 , σ_B^2 , $r_H(\tau)$, $s_H(\tau)$, $r_{BH}(\tau)$, $s_{BH}(\tau)$, $r_B(\tau)$, $s_B(\tau)$.

В целом можно утверждать, что модель сложного распределенного объекта должна обеспечивать достоверное воспроизведение статистических и спектрально-корреляционных характеристик эхосигнала и ШК, а также их изменения при переходе от одного фрагмента объекта к другому. Под сложным распределенным объектом понимается объект, пространственной структурой которого нельзя пренебречь.

1.2. Методы имитации отражений от распределенных объектов

Цель подраздела – проанализировать известные методы моделирования отражений от распределенных объектов.

Сигналы, отраженные от различного рода распределенных объектов (будь то поверхность земли или облака искусственных металлизированных

отражателей), с точки зрения статистики обладаю общими особенностями, отмеченными в предыдущем пункте.

На основе отмеченных особенностей и строится математическое моделирование отражений от распределенных объектов.

В отечественной и зарубежной литературе для решения этой задачи предложено два различных подхода: феноменологический и электродинамический.

Электродинамический подход основан на непосредственном математическом описании отражающих свойств распределенного объекта [46, 73-84]. Этот подход появился исторически первым. Точность моделирования отраженного сигнала определяется, в первую очередь, точностью моделирования геометрии объекта и его электродинамических характеристик. Достоинство такого подхода – непосредственная связь с физикой процессов, протекающих при рассеянии электромагнитных волн распределенным объектом, что во многом гарантирует достоверность получаемых результатов [73-74]. Общим недостатком электродинамических моделей является громадные объемы вычислений, необходимых для расчета поля обратного рассеяния моделируемого объекта. Этот недостаток, по сути, исключает возможность такого подхода для проведения полунатурного моделирования сколько-нибудь сложного объекта в РМВ. Как следствие, электродинамический подход используется в основном для теоретических исследований, связанных с отражениями электромагнитных волн, длина которых соизмерима с неровностями рельефа [46].

Феноменологический подход основан на создании неких искусственных моделей, с заданной точностью воспроизводящих свойства распределенного объекта [25, 44, 85-87]. Наибольшее распространение получили геометрические модели. Они базируются на замещении моделируемого объекта совокупностью большого количества статистически

независимых отражателей, случайным образом распределенных в области пространства, ограниченной размерами объекта [1, 13-16, 24, 44, 51]. Геометрическая модель предполагает, по сути, прямую практическую реализацию выражений (1.1) – (1.3), где значения I, J, K выбраны очень большими.

Достоинствами геометрических моделей являются четкая физическая интерпретация и высокая точность моделирования пространственной структуры распределенного объекта. Следовательно, такие модели могут обеспечить высокую точность воспроизведения характеристик отраженного сигнала и ШК. Недостатком моделей является большие объемы вычислений, которые необходимы для выполнения моделирования в РМВ. Большой объем вычислений обусловлен тем, что модель предполагает большое количество отражателей, которое для распределенных объектов может исчисляться миллионами. Долгое время это ограничивало применение феноменологического подхода к полунатурному моделированию в РМВ. В частности, в [33] указано, для адекватной имитации эхосигнала радиофизической сцены в УВЧ, СВЧ диапазонах необходимо моделировать поверхность в виде совокупности $10^9 \div 10^{10}$ отражающих элементов (при имитации в РМВ производительность вычислительных средств должна составлять $1.4 \cdot 10^{14} \div 1.4 \cdot 10^{19}$ арифметических операций в секунду). Очевидно, что добиться указанной производительности можно только при использовании уникальных вычислительных средств.

Поскольку объем вычислений при моделировании пропорционален количеству отражателей геометрической модели, то очевидным решением является сокращение количества отражателей модели. Разумеется, при этом должна быть обеспечена заданная точность моделирования рассмотренных ранее характеристик. В [16] показано, что в ряде случаев количество

отражателей может быть сведено к минимуму, а именно, к двум. Кратко рассмотрим основные принципы, лежащие в основе этой модели.

Двухточечная модель в простейшем случае представляет собою два не разрешаемых в пространстве и не влияющих друг на друга излучателя, разнесенные на расстояние L и лежащие в рассматриваемой координатной плоскости радиолокационного наблюдения на дальностях r_1 и r_2 от точки наблюдения O (Рисунок 1.1). Амплитудами и фазами подводимых к излучателям сигналов можно управлять. Будем называть такую модель когерентной.

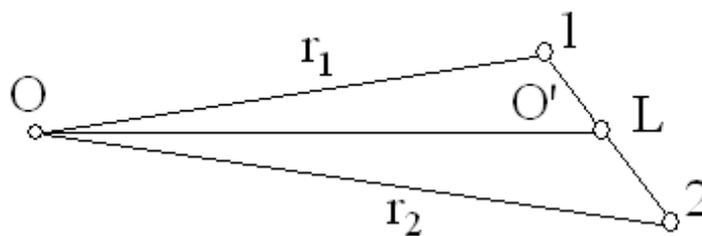


Рисунок 1.1. Двухточечная модель протяженного объекта

При зондировании объекта, представленного моделью Рисунок 1.1, в точку наблюдения по двум различным направлениям приходят две отраженные волны со сферическим фазовым фронтом. Вследствие интерференции этих волн фазовый фронт суммарной волны отличается от сферы, а поскольку антенна РЛС определяет направление прихода электромагнитной волны по нормали к фазовому фронту, то нормаль укажет на КЦИ.

КЦИ располагается на прямой, проходящей через излучатели. Положение его на прямой определяется соотношением амплитуд и фаз волн, излучаемых точками 1 и 2, по следующему соотношению [16]:

$$\gamma = \frac{1 - z_0^2}{1 + 2z_0 \cos \psi + z_0^2}, \quad (1.22)$$

где γ – обобщенная координата, нормированная к половине расстояния между излучающими точками, $z_0 = E_1/E_2$ – отношение амплитуд сигналов излучаемых точками, ψ – разность фаз этих сигналов. В частности, если точки излучают равные по амплитуде синфазные сигналы, то КЦИ окажется в точке геометрического центра объекта (точка O' на Рисунке 1.1).

Место расположение КЦИ при этом не ограничивается пространством между излучателями, он может выходить за пределы модели и формально бесконечно удаляться от излучателей.

Недостаток когерентной модели в следующем. В литературе [16] показано, что при несоблюдении точности установки фаз и амплитуд сигналов излучающих точек, возникающие ошибки установки положения КЦИ могут быть весьма значительными. Более того, требуемую точность поддержания фаз и амплитуд сигналов не всегда удается реализовать на практике, что приводит к существенным ошибкам при позиционировании объекта [16, 51].

Когерентные геометрические модели позволяют усовершенствовать процесс имитации отражений от движущегося сосредоточенного объекта. Для решения указанной задачи применяются так называемые матричные имитаторы, принцип работы которых основан на когерентной геометрической модели [8-12, 88-89]. Такие устройства представляют собою совокупность жестко закрепленных излучателей, подключенных к формирователю сигналов. Излучатели располагаются в дальней зоне антенны испытуемого устройства так, чтобы отдельные излучатели не разрешались по угловым координатам. Такой способ формирования отраженного сигнала позволяет получить высокие угловые скорости перемещения имитируемого

объекта и исключить ошибки, присущие механическим системам (например, таким как [28-29]).

Несмотря на попытки использования устройств на основе когерентной модели для имитации отражений от распределенных объектов [13, 90], основная область их применения – имитация отражений от движущихся сосредоточенных объектов.

Кроме того, всем подобным устройствам присущ указанный выше недостаток когерентной модели, а именно точность позиционирования имитируемого объекта определяется точностью фазировки сигналов излучателей матричного имитатора. Для имитации отражений распределенных объектов могут быть использованы некогерентные модели, лишённые указанных недостатков. Рассмотрим известные некогерентные модели.

В работе [16] рассмотрено применение двухточечной некогерентной геометрической модели для замещения распределенного объекта. При этом излучающие точки модели расположены вдоль одной из координат (обобщенной координаты γ). Функция распределения плотности интенсивности излучаемых сигналов имеет вид:

$$F_r(\gamma) = \sigma_1^2 \delta(\gamma - 1) + \sigma_2^2 \delta(\gamma + 1), \quad (1.23)$$

где $\delta(\)$ – дельта-функция, σ_1, σ_2 – среднеквадратическое отклонение (СКО) сигналов излучателей.

Математическое ожидание положения КЦИ [16]:

$$m_\gamma = \frac{1 - \nu^2}{1 + \nu^2}, \quad (1.24)$$

где $\nu = \sigma_1 / \sigma_2$.

Параметр μ_γ [16]:

$$\mu_\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 - v^2}{1 + v^2}\right)^2}}. \quad (1.25)$$

Очевидно, что в этом случае параметры распределения ШК будут жестко связаны между собой соотношением:

$$\mu_\gamma(m_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{1 - m_\gamma^2}}. \quad (1.26)$$

При имитации распределенного объекта с использованием такой модели оказывается невозможным независимо управлять угловыми размерами объекта и его положением. Это приводит к тому, что рассмотренная модель имеет ограниченное применение.

В работах [29-32] предложена некогерентная трехточечная геометрическая модель с неэквидистантным расположением излучателей. Вид функции распределения интенсивностей сигналов для такой модели представлен на Рисунке 1.2.

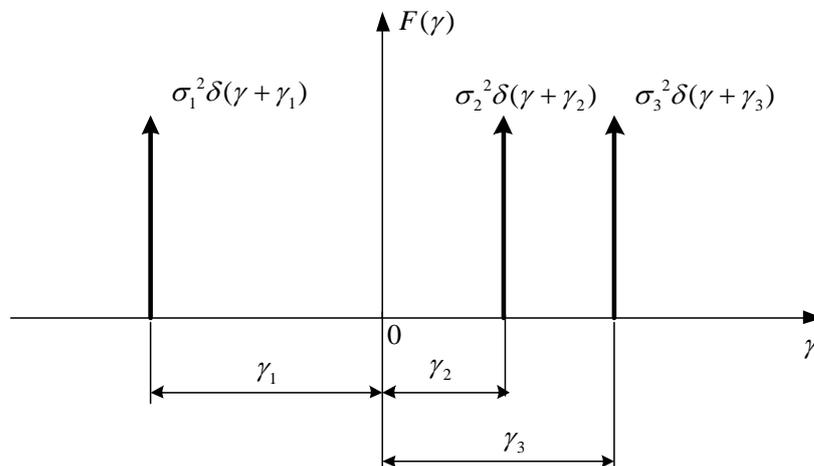


Рисунок 1.2. Вид функции распределения интенсивностей сигналов для трехточечной неэквидистантной модели

Параметры ПРВ ШК для такой модели можно определить, как:

$$m_\gamma = \frac{\gamma_1 v_1^2 + \gamma_2 v_2^2 + \gamma_3}{v_1^2 + v_2^2 + 1}, \quad (1.27)$$

$$\begin{aligned} \mu_\gamma &= \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + 1}{v_1^2 \gamma_1^2 + v_2^2 \gamma_2^2 + \gamma_3^2 - 2(m_\gamma (\gamma_1 v_1^2 + \gamma_2 v_2^2 + \gamma_3)) + m_\gamma^2 \cdot (v_1^2 + v_2^2 + 1)}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_1^2 v_1^2 + \gamma_2^2 v_2^2 + \gamma_3^2}{v_1^2 + v_2^2 + 1} - \left[\frac{\gamma_1 v_1^2 + \gamma_2 v_2^2 + \gamma_3}{v_1^2 + v_2^2 + 1} \right]^2}}, \end{aligned}$$

где $v_1 = \sigma_1/\sigma_3$, $v_2 = \sigma_1/\sigma_2$, γ_1 , γ_2 , γ_3 – положение излучателей по обобщённой координате γ .

Трёхточечная модель позволяет независимо друг от друга управлять параметрами ПРВ ШК в ограниченном диапазоне. Выражения, определяющие границы диапазона независимого управления параметрами распределения ШК, получены в [31]:

$$\begin{aligned} \mu_\gamma &= \frac{1}{\sqrt{-(m_\gamma - \gamma_3)(m_\gamma - \gamma_1)}}, \quad \mu_\gamma = \frac{1}{\sqrt{-(m_\gamma - \gamma_2)(m_\gamma - \gamma_1)}}, \quad (1.28) \\ \mu_\gamma &= \frac{1}{\sqrt{-(m_\gamma - \gamma_3)(m_\gamma - \gamma_2)}}. \end{aligned}$$

Для обеспечения заданного значения параметров ПРВ ШК к излучателям модели необходимо подвести сигналы, мощности которых равны [31]:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\sigma_B^2 + \sigma_H^2 m_\gamma^2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_3 + \sigma_H^2 \gamma_2 \gamma_3}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}, \quad (1.29) \\ P_2 &= -\frac{\sigma_B^2 + \sigma_H^2 m_\gamma^2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_1 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_3 + \sigma_H^2 \gamma_1 \gamma_3}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}, \\ P_3 &= \frac{\sigma_B^2 + \sigma_H^2 m_\gamma^2 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_1 - \sigma_H^2 m_\gamma \gamma_2 + \sigma_H^2 \gamma_1 \gamma_2}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)}, \end{aligned}$$

где σ_B^2 , σ_H^2 , m_γ – параметры моделируемого объекта.

Адекватное моделирование спектрально-корреляционных характеристик ШК объекта обеспечивается, если к излучателям модели подводятся сигналы с корреляционными функциями вида [31]:

$$R_1(\tau) = \frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}, \quad (1.30)$$

$$R_2(\tau) = -\frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}, \quad R_3(\tau) = \frac{\int F_r(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)},$$

$$S_1(\tau) = \frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}, \quad (1.31)$$

$$S_2(\tau) = -\frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}, \quad S_3(\tau) = \frac{\int F_s(\gamma, \tau)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)},$$

где $R_i(\tau)$ и $S_i(\tau)$ соответственно автокорреляционные и взаимно корреляционные функции квадратурных компонент сигналов, поступающих на i -ый излучатель модели.

Предложенный в [31] метод синтеза трехточечной модели приводит к итерационной процедуре, в ходе которой определяются корреляционные функции (1.30) - (1.31), проверяется их реализуемость. Если все функции реализуемы, синтезируется модель. Во многих случаях данная процедура не приводит к реализуемой модели.

В работах [33-35, 91] рассматривается применение некогерентных геометрических моделей для построения матричных имитаторов электромагнитных полей, отраженных от распределенных объектов. Принцип действия такого устройства основан на трехточечной неэквидистантной модели. При этом излучатели расположены в линию. Описание экспериментального образца матричного имитатора электромагнитных полей, отраженных от поверхности Земли при маловысотном полете приведено в [33-34].

В итоге, до настоящего времени оказались нерешенными следующие вопросы.

В работах, посвященных феноменологическому подходу, рассматриваются вопросы синтеза **только одномерных некогерентных геометрических моделей**. Как следствие, устройства формирования эхосигналов на основе таких моделей могут быть применены для имитации отражений только от одномерных распределенных объектов (объектов, распределенных по азимуту или углу места). Вопросы построения двумерных и трехмерных некогерентных моделей ранее не рассматривались.

Очевидно, что наиболее перспективный подход к моделированию отражений от распределенных объектов – использование некогерентных геометрических моделей. Однако, вопрос разработки средств имитации сигналов на основе таких моделей в литературе освящен мало. Можно указать лишь на некогерентную трехточную геометрическую модель с неэквидистантным расположением излучателей, предложенную в [33-35, 91], и экспериментальный образец матричного имитатора на ее основе [33-34]. Вместе с тем, предложенный аппарат синтеза такой модели во многом неудобен, так как приводит к итерационной процедуре синтеза. Кроме того, эта модель также одномерная.

Еще одним важным моментом, связанным с синтезом геометрических моделей распределенных объектов, является вопрос описания свойств моделируемого объекта. Традиционно при описании отражающих свойств распределенных объектов используются такие понятия как тип покрова поверхности объекта, УЭПР, спектрально-корреляционные характеристики доплеровских флуктуаций отраженного сигнала. Вместе с тем, как было показано ранее, достоверное моделирование отражений от распределенных объектов должно учитывать его ШК. Описание ШК объекта основывается на использовании функций $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ (см. (1.13) и (1.14)), определяющих отражающие свойства элементарных отражателей объекта.

Все статистические характеристики ШК объекта могут быть получены через эти функции по выражениям, приведенным в предыдущем пункте. Логично предположить, что аппарат синтеза геометрических моделей может быть упрощен, если перейти от использования традиционных характеристик отражающих свойств объектов к описанию, основанному на использовании функций $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$, минуя стадию пересчета традиционных характеристик в те параметры, которые определяют модель отражений. В качестве возможного такого описание можно предложить распределение по поверхности моделируемого объекта параметров ПРВ ШК μ_γ и m_γ . Для этого необходимо представить поверхность отражающего объекта в виде совокупности взаимно неперекрывающихся фрагментов, каждый из которых замещается геометрической моделью. Разумеется, модель должна адекватно воспроизводить ШК этого фрагмента и, кроме того, обладать другими требуемыми свойствами. Например, при имитации в реальном времени во многих случаях важно, чтобы геометрическая модель обладала инвариантностью конфигурации к смене угла визирования. В таком случае, при изменении угла визирования имитируемого объекта не требуется изменять конфигурацию излучателей модели. Такой подход позволит экономить вычислительные ресурсы при синтезе моделей в РМВ.

Предложенное описание отражающих свойств распределенных объектов ранее не рассматривалось. Однако, вполне очевидно, что данный подход может оказаться весьма полезным при разработке средств имитации эхосигналов от распределенных объектов.

Вышеозначенные вопросы составляют проблематику, решению которой посвящена данная работа.

Сформулируем **основные задачи** диссертационного исследования.

1. Определить конфигурации двумерных малоточечных геометрических моделей (количество излучателей, их взаимное расположение), обеспечивающие возможность независимого управления

ПРВ ШК по двум угловым координатам. Установить зависимости, связывающие параметры ПРВ ШК с параметрами рассмотренных моделей (координаты излучателей, мощность излучаемых сигналов).

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

3. Развить полученные результаты до уровня их практического использования и произведена их проверка.

1.3. Заключение по первому разделу

1. Проанализированы основные свойства и характеристики отражений от распределенных объектов. Можно принять, что для достоверного моделирования, необходимо с заданной точностью обеспечить:

- нормальное распределение мгновенных значений отраженного сигнала;
- требуемые спектрально-корреляционные характеристики доплеровских флуктуаций отраженного сигнала;
- распределение ШК вида (1.7) с заданными параметрами μ_γ и m_γ ;
- равенство спектрально-корреляционных характеристик ШК (1.16) – (1.21) для модели и имитируемого объекта.

Если удовлетворение первых двух пунктов представляет собою тривиальную техническую задачу, то вопрос достоверного моделирования ШК распределенного объекта в литературе освящен слабо.

2. Проанализированы основные методы моделирования отражений от распределенных объектов. Показано, что наиболее перспективный путь в этом направлении – использование некогерентных геометрических моделей. До настоящего времени вопросы, связанные с разработкой методов синтеза двумерных и трехмерных некогерентных геометрических моделей, не исследовались.

3. Показано, что существующий традиционный подход к заданию отражающих свойств распределенных объектов не соотносится с необходимостью моделировать ШК объекта. Предложен иной способ задания отражающих свойств объекта через характеристики ШК. Суть этого способа состоит в фактической декомпозиции сложного поверхностно-распределенного объекта на отдельные фрагменты, каждый из которых замещается геометрической моделью.

4. Исходя из обозначенных проблем, сформулированы основные задачи исследования.

2. МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ШУМОВ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Целью данного раздела является разработка аппарата синтеза двумерных геометрических моделей, позволяющих осуществлять достоверное моделирование ШК с заданными параметрами ПРВ. При этом модели должны обеспечивать возможность покоординатного управления параметрами ПРВ ШК.

Для этого необходимо решить следующие **задачи**.

1. Для известных двух- и трехточечных моделей проанализировать связь параметров ПРВ ШК с конфигурацией и параметрами модели, а также углом визирования. На основе этого анализа оценить их применимость для замещения поверхностно-распределенных объектов.

2. Рассмотреть модели с большим чем три количеством излучателей. Получить соотношения для определения параметров распределения ШК по параметрам моделей. Проанализировать свойства моделей (с точки зрения возможности независимого управления параметрами распределения ШК относительно двух ортогональных осей, возможности независимого управления параметрами распределения ШК при визировании вдоль одной оси, а также инвариантности конфигурации модели к углу визирования). На основе этого анализа обосновать применимость рассмотренных моделей для замещения поверхностно-распределенных объектов.

3. Определить условия, гарантирующие инвариантность геометрии модели к углу визирования для произвольной N-точечной конфигурации излучателей двумерной геометрической модели.

4. Определить условия, выполнение которых гарантирует возможность независимого управления параметрами распределения ШК по двум ортогональным осям, а также при визировании вдоль одной оси для произвольной N -точечной конфигурации излучателей двумерной геометрической модели.

5. Получить соотношения, позволяющие синтезировать модели с заданными свойствами и параметрами ПРВ ШК.

2.1. Известные геометрические модели

В литературе широко известна двухточечная геометрическая модель [13, 16, 51]. Ранее рассматривался случай расположения излучателей в линию, а направление визирования модели предполагалось всегда ортогональным линии расположения излучателей. Проанализируем возможности такой модели в случае расположения излучателей на плоскости (Рисунок 2.1, L – величина разноса излучателей).

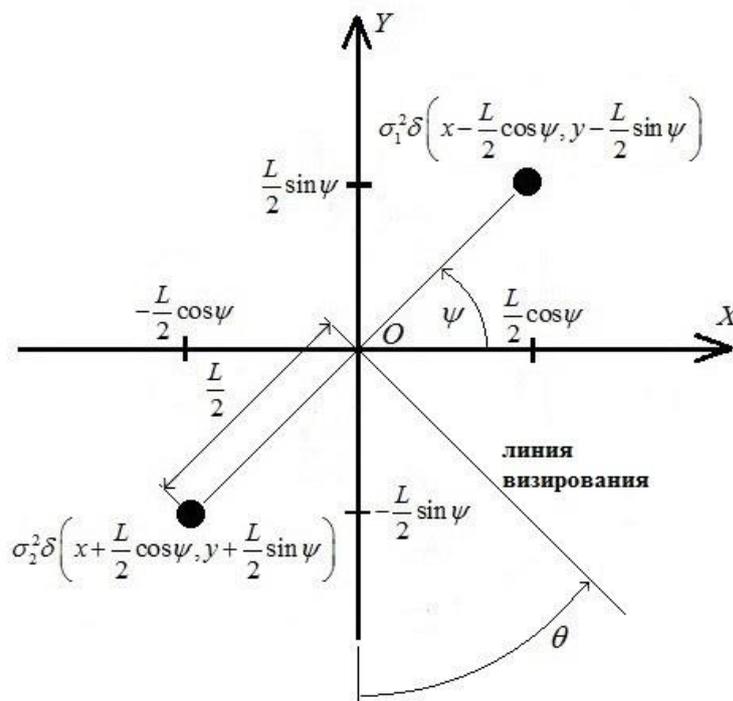


Рисунок 2.1. Расположение двух излучающих точек на плоскости

Угол поворота прямой, соединяющей излучающие точки, относительно оси ОХ $\psi \in (0, \pi/2)$. На Рисунке 2.1 угол $\psi = \pi/4$.

Функцию распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек можно представить в виде:

$$F_r(x, y) = \sigma_1^2 \delta\left(x - \frac{L}{2} \cos \psi, y - \frac{L}{2} \sin \psi\right) + \sigma_2^2 \delta\left(x + \frac{L}{2} \cos \psi, y + \frac{L}{2} \sin \psi\right). \quad (2.1)$$

Поскольку при определенном направлении визирования, рассматриваемая модель сводится к модели с излучателями, расположенными вдоль одной координаты, то для нахождения параметров распределения ШК можно применить результаты, полученные в [16].

При визировании модели Рисунка 2.1 под углом θ (здесь и далее подразумевается угол визирования в азимутальной плоскости, если иное не оговорено отдельно) функция распределения интенсивности сигналов излучателей примет вид, показанный на Рисунке 2.2.

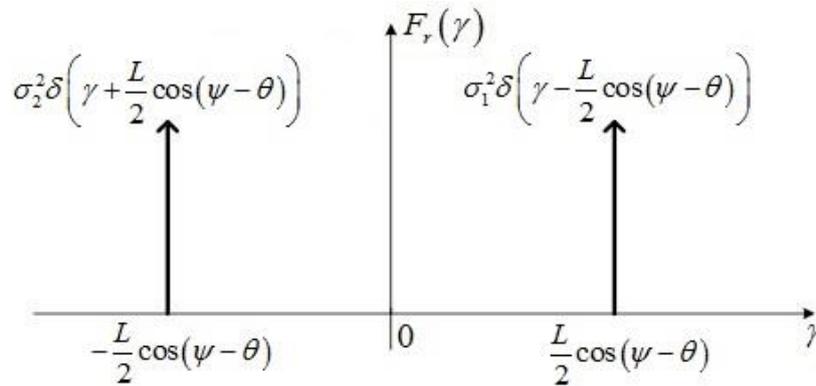


Рисунок 2.2. Функция распределения интенсивности сигналов излучающих точек модели при угле визирования $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$.

При угле визирования θ математическое ожидание ПРВ ШК будет определяться следующим соотношением:

$$m_\gamma(\theta) = \frac{\int \gamma F_r(\gamma) d\gamma}{\int F_r(\gamma) d\gamma} = \quad (2.2)$$

$$= \frac{L}{2} \cos(\psi - \theta) \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \frac{L}{2} \cos(\psi - \theta) \frac{1 - \nu^2}{1 + \nu^2},$$

где $\nu = \sigma_2 / \sigma_1$.

При $\psi = \pi/4$ и $\theta = -\pi/4; 3\pi/4$ модель сводится к одноточечной, т.е. будет наблюдаться одна точка с суммарной интенсивностью излучения.

Параметр μ_γ может быть определен согласно выражению (1.10):

$$\mu_\gamma = \sigma_H / \sigma_B,$$

где

$$\sigma_H^2 = \int_\gamma F_r(\gamma) d\gamma = \sigma_1^2 + \sigma_2^2,$$

$$\sigma_B^2 = \int_\gamma (\gamma - m_\gamma)^2 F_r(\gamma) d\gamma = \int_\gamma \gamma^2 F_r(\gamma) d\gamma - 2 \int_\gamma \gamma m_\gamma F_r(\gamma) d\gamma + \int_\gamma m_\gamma^2 F_r(\gamma) d\gamma. (2.3)$$

Рассмотрим полученные в (2.3) интегралы по отдельности:

$$\int_\gamma \gamma^2 F_r(\gamma) d\gamma = \frac{L^2}{4} \cos^2(\psi - \theta) [\sigma_1^2 + \sigma_2^2];$$

$$\int_\gamma \gamma m_\gamma F_r(\gamma) d\gamma = m_\gamma \int_\gamma \gamma F_r(\gamma) d\gamma = \frac{L^2}{4} \frac{[\sigma_1^2 - \sigma_2^2]^2 \cos^2(\psi - \theta)}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = m_\gamma^2 \sigma_H^2;$$

$$\int_\gamma m^2 F_r(\gamma) d\gamma = m^2 \int_\gamma F_r(\gamma) d\gamma = m_\gamma^2 \sigma_H^2.$$

Следовательно, параметр μ_γ равен:

$$\mu_\gamma^2 = \frac{\sigma_H^2}{\sigma_B^2} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\frac{L^2}{4} \cos^2(\psi - \theta) \left[(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - \frac{[\sigma_1^2 - \sigma_2^2]^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right]}. (2.4)$$

Нетрудно убедиться, что мы пришли также к однозначной взаимосвязи параметров ПРВ ШК (как и в [91]):

$$\mu_\gamma^2 = \frac{1}{\frac{L^2}{4} \cos^2(\psi - \theta) - m_\gamma^2}.$$

Повторимся, что это ограничивает применение двухточечной модели при имитации. Кроме того, с использованием этой модели не может быть решена задача обеспечения заданных параметров ПРВ ШК вдоль двух ортогональных направлений (например, при визировании вдоль осей ОХ и ОУ). Действительно, при визировании вдоль осей координат согласно (2.2) и (2.4) имеем:

$$m_Y = l_c \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \quad m_X = l_s \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \quad (2.5)$$

$$\mu_Y^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{l_c^2 \left[(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) - \frac{[\sigma_1^2 - \sigma_2^2]^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right]}; \quad \mu_X^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{l_s^2 \left[(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) - \frac{[\sigma_1^2 - \sigma_2^2]^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right]}.$$

Полученные выражения (2.5) показывают взаимную связь параметров распределения, относящихся к разным направлениям визирования. Очевидно, что, задавая параметры распределения ШК по одной из осей (путем задания мощностей излучателей), мы тем самым задаем соответствующие параметры и по другой оси. Таким образом, применение двухточечной модели для имитации отражений от распределенного объекта крайне ограничено.

Также не может быть достигнута инвариантность модели к углу визирования. Это объясняется тем, что параметры распределения зависят от угла визирования θ . Для определенных углов модель и вовсе сводится к одноточечной, то есть никаких ШК в данной направлении не будет наблюдаться.

Получим уравнения, позволяющие по параметрам ПРВ ШК синтезировать двухточечную модель (т.е. определить мощности излучателей модели, расстояние между излучателями).

Введем обозначения: $A = \frac{L}{2} \cos(\psi - \theta)$, $P_{\Delta} = \sigma_1^2 - \sigma_2^2$, $P_{\Sigma} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$. Тогда параметры ПРВ ШК можно представить в виде:

$$\begin{cases} m_{\gamma} = A \frac{P_{\Delta}}{P_{\Sigma}} \\ \mu_{\gamma}^2 = \frac{P_{\Sigma}}{A^2 \left(P_{\Sigma} - \frac{P_{\Delta}^2}{P_{\Sigma}} \right)} \end{cases} \quad (2.6)$$

Таким образом, задача синтеза сводится к решению данной системы уравнений относительно L , ψ , σ_1^2 , σ_2^2 .

При любом θ уравнения, входящие в систему (2.6) являются зависимыми, следовательно, в общем случае нельзя установить произвольное значение обоих параметров (m_{γ} и μ_{γ}) одновременно.

Таким образом, данную модель следует использовать в том случае, когда достаточно обеспечить требуемое значение только одного параметра ПРВ ШК. При этом синтез может выполняться по выражениям (2.7) - (2.8).

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{\Sigma}} = \frac{m_{\gamma}}{A(\theta)}, \quad \mu_{\gamma} (m_{\gamma}, \theta) = \frac{1}{\sqrt{A^2(\theta) - m_{\gamma}^2}}. \quad (2.7)$$

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{\Sigma}} = \sqrt{1 - \frac{1}{\mu_{\gamma} A^2(\theta)}}, \quad m_{\gamma} (\mu_{\gamma}, \theta) = \sqrt{A^2(\theta) - \frac{1}{\mu_{\gamma}^2}}. \quad (2.8)$$

С точки зрения имитации отражений от распределенных объектов, больший интерес представляет трехточечная модель. Как было указано ранее, такая модель лишена однозначной взаимосвязи параметров

распределения ШК. Однако, ранее рассматривался только случай расположения излучателей в линию. Рассмотрим расположение трех излучателей на плоскости (Рисунок 2.3).

Положение излучающей точки №1 на плоскости определяется расстоянием L_1 и углом ψ_1 , №2 – расстоянием L_2 и углом ψ_2 , положение излучателя №3 совпадает с началом системы координат Углы $\psi_1, \psi_2 \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$.

При $\psi_1 = \psi_2 = 0$ излучатели располагаются вдоль оси ОХ, при $\psi_1 = \psi_2 = \pi/2$ – вдоль оси ОУ.

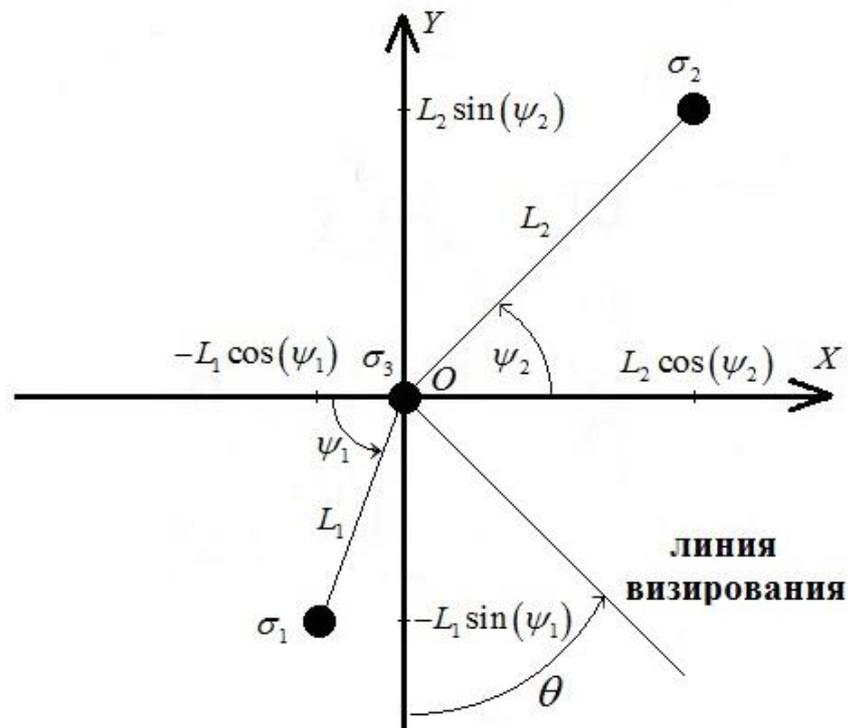


Рисунок 2.3. Расположение трех излучающих точек на плоскости.

Функцию распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек можно представить в виде:

$$F_r(x, y) = \sigma_1^2 \delta(x + L_1 \cos \psi_1) \delta(y - L_1 \sin \psi_1) + \sigma_2^2 \delta(x + L_2 \cos \psi_2) \delta(y - L_2 \sin \psi_2) + \sigma_3^2 \delta(x) \delta(y). \quad (2.9)$$

При визировании поверхности под углом $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ функция распределения интенсивностей излучающих точек приобретает вид, показанный на Рисунке 2.4.

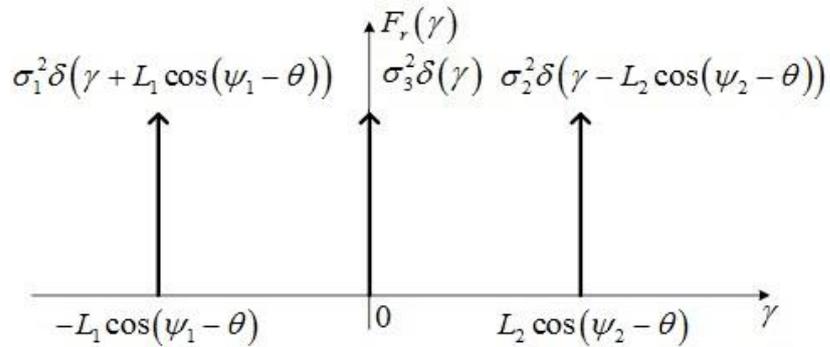


Рисунок 2.4. Функция распределения интенсивности сигналов излучающих точек модели при угле визирования $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$.

Если $\psi_1 = \psi_2 = \psi$, т.е. угол наклона излучателей №1 и №2 одинаковый, то при визирование такой модели поверхности под углом $\theta = -(\pi/2 - \psi)$, модель сводится к одноточечной. В этом случае будет наблюдаться одна точка с суммарной интенсивностью излучения.

Математическое ожидание ШК при визировании модели под углом $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$:

$$m_\gamma = \frac{\sigma_2^2 l_{c2}(\theta) - \sigma_1^2 l_{c1}(\theta)}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = \frac{\nu_2^2 l_{c2}(\theta) - l_{c1}(\theta)}{1 + \nu_2^2 + \nu_3^2}, \quad (2.10)$$

где $l_{c1}(\theta) = L_1 \cos(\psi_1 - \theta)$, $l_{c2}(\theta) = L_2 \cos(\psi_2 - \theta)$, $\nu_2 = \sigma_2/\sigma_1$, $\nu_3 = \sigma_3/\sigma_1$.

Параметр μ_γ равен:

$$\mu_\gamma^2 = \frac{\sigma_H^2}{\sigma_B^2} = \frac{\sigma_H^2}{l_{c1}^2(\theta)\sigma_1^2 + l_{c2}^2(\theta)\sigma_2^2 - m_\gamma^2\sigma_H^2} = \quad (2.11)$$

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

где $\sigma_H^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2$, $\sigma_B^2 = l_{c1}^2(\theta)\sigma_1^2 + l_{c2}^2(\theta)\sigma_2^2 - m_\gamma^2 \sigma_H^2$.

Проанализировав выражения (2.10) и (2.11) нетрудно убедиться, что такая модель также не может обладать инвариантными к углу визирования свойствами. Кроме того, также возможен вариант, когда для определенных углов будет наблюдаться одиночный точечный излучатель.

При визировании рассматриваемой модели (см. Рисунок 2.3) в направлении оси OY ($\theta=0$) и оси OX ($\theta=-\pi/2$) получим следующие значения параметров распределения:

$$m_Y = \frac{\sigma_2^2 L_2 \cos(\psi_2) - \sigma_1^2 L_1 \cos(\psi_1)}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}; m_X = \frac{-\sigma_2^2 L_2 \sin(\psi_2) + \sigma_1^2 L_1 \sin(\psi_1)}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}; \quad (2.12)$$

$$\mu_Y^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{\sigma_1^2 L_1^2 \cos^2 \psi_1 + \sigma_2^2 L_2^2 \cos^2 \psi_2 - \frac{(\sigma_2^2 L_2 \cos \psi_2 - \sigma_1^2 L_1 \cos \psi_1)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}};$$

$$\mu_X^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{\sigma_1^2 L_1^2 \sin^2 \psi_1 + \sigma_2^2 L_2^2 \sin^2 \psi_2 - \frac{(\sigma_1^2 L_1 \sin \psi_1 - \sigma_2^2 L_2 \sin \psi_2)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}.$$

Полученные выражения (2.12) свидетельствуют о наличие взаимной связи между одноименными параметрами, относящимися к ортогональным направлениям визирования. Например, установив мощности сигналов, подводимых к излучающим точкам, для обеспечения требуемых параметров распределения при визировании вдоль оси OY , мы тем самым устанавливаем и параметры распределения вдоль оси OX . При имитации это означает возможность задания положения и угловых размеров распределенного

объекта только вдоль одного из направлений визирования. Следовательно, модель также не позволяет «развязать» два ортогональных направления визирования при имитации.

Получим соотношения, позволяющие синтезировать рассматриваемую модель. При этом можно обеспечить параметры ПРВ ШК только вдоль одной из осей.

Введем следующие обозначения:

$$l_{c1} = L_1 \cos \psi_1, \quad l_{c2} = L_2 \cos \psi_2, \quad l_{s1} = L_1 \sin \psi_1, \quad l_{s2} = L_2 \sin \psi_2.$$

С учетом этого получаем:

$$m_X = \frac{\sigma_2^2 l_{c2} - \sigma_1^2 l_{c1}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}; \quad m_Y = \frac{\sigma_1^2 l_{s1} - \sigma_2^2 l_{s2}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}; \quad (2.13)$$

$$\mu_X^2 = \frac{1}{\frac{\sigma_1^2 l_{c1}^2 + \sigma_2^2 l_{c2}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} - m_X^2}; \quad \mu_Y^2 = \frac{1}{\frac{\sigma_1^2 l_{s1}^2 + \sigma_2^2 l_{s2}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} - m_Y^2}.$$

Пусть значения σ_Σ^2 , L_i , ψ_i , $i=1,2$ заданы. Тогда для получения значений мощностей, обеспечивающих заданные параметры m_X и μ_X^2 , необходимо решить СЛАУ:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_X = \frac{\sigma_2^2 l_{c2} - \sigma_1^2 l_{c1}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \\ \mu_X^2 = \frac{1}{\frac{\sigma_1^2 l_{c1}^2 + \sigma_2^2 l_{c2}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} - m_X^2}; \\ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = \sigma_\Sigma^2 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} (m_X + l_{c1})\sigma_1^2 + (m_X - l_{c2})\sigma_2^2 + m_X\sigma_3^2 = 0 \\ \left(\frac{1}{\mu_X^2} - l_{c1}^2 + m_X^2\right)\sigma_1^2 + \left(\frac{1}{\mu_X^2} - l_{c2}^2 + m_X^2\right)\sigma_2^2 + \left(\frac{1}{\mu_X^2} + m_X^2\right)\sigma_3^2 = 0. \\ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = \sigma_\Sigma^2 \end{cases}$$

Решая СЛАУ (2.14), например, по методу Крамера, получаем:

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2 \left(l_{c2} m_X - m_X^2 - \frac{1}{\mu_X^2} \right)}{l_{c1} (l_{c1} - l_{c2})}; \quad (2.15)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2 \left(m_X^2 + l_{c1} m_X + \frac{1}{\mu_X^2} \right)}{l_{c2} (l_{c2} - l_{c1})};$$

$$\sigma_3^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2 \left[(l_{c1} + l_{c2}) \left(m_X^2 - l_{c1} l_{c2} + \frac{1}{\mu_X^2} \right) + m_X (l_{c1}^2 - l_{c2}^2) \right]}{l_{c1} l_{c2} (l_{c1} - l_{c2})}.$$

Параметры распределения ШК относительно оси OY при заданных мощностях сигналов излучателей можно определить по формулам (2.13). При этом изменить их значение, не изменяя соответствующие параметры относительно другой оси, нельзя.

Аналогично выглядят выражения для определения мощностей сигналов излучателей по заданным параметрам распределения ШК относительно оси OY , если в (2.15) произвести замены:

$$m_X \Leftrightarrow m_Y; \mu_X \Leftrightarrow \mu_Y; l_{c1} \Leftrightarrow l_{s1}; l_{c2} \Leftrightarrow l_{s2}.$$

Выражения, определяющие границы диапазона, в котором можно независимо управлять параметрами распределения получены в [96]. Применительно к модели (Рисунок 2.3) эти выражения могут быть записаны

по функции распределения интенсивности сигналов излучателей для случая визирования вдоль одной из осей координат (Рисунок 2.4).

При визировании вдоль оси OX имеем:

$$\mu_{X \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_X - L_2 \cos \psi_2)(m_X - L_1 \cos \psi_1)}}, \quad (2.16)$$

$$\mu_{X \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X - L_1 \cos \psi_1)}}, \quad \mu_{X \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X - L_2 \cos \psi_2)}}.$$

При визировании вдоль оси OY имеем:

$$\mu_{Y \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_Y - L_1 \sin \psi_1)(m_Y - L_2 \sin \psi_2)}}, \quad (2.17)$$

$$\mu_{Y \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y - L_2 \sin \psi_2)}}, \quad \mu_{Y \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y - L_1 \sin \psi_1)}}.$$

Выводы:

1. Анализ известных геометрических моделей показал, что возможностей этих моделей с точки зрения имитации отражений от поверхностно-распределенных объектов недостаточно. Модели не позволяют решить задачу обеспечения заданной ПРВ ШК по двум угловым координатам.

2. Известные модели также не обладают свойством инвариантности параметров распределения ШК относительно угла визирования.

3. В некоторых частных случаях использование таких моделей будет полезно, поскольку они имеют минимальное число излучателей. В данном подразделе получены соотношения, определяющие зависимость параметров ПРВ ШК от угла визирования, и выражения, позволяющие синтезировать двумерную модель с двумя и тремя излучателями.

2.2. *Иные конфигурации двумерных геометрических моделей*

В предыдущем подразделе было показано, что возможностей известных геометрических моделей недостаточно для моделирования отражений от поверхностно-распределенных объектов. Выходом из сложившейся ситуации видится использование дополнительных излучателей. Поэтому необходимо выполнить следующее:

- рассмотреть конфигурации, содержащие большее чем три число излучателей;
- проанализировать свойства таких моделей с точки зрения возможности независимого управления параметрами распределения ШК по двум угловым координатам, а также инвариантности геометрии модели к смене угла визирования;
- оценить применимость рассмотренных моделей для замещения поверхностно-распределенных объектов;
- получить соотношения, определяющие зависимость параметров распределения ШК от угла визирования модели;
- получить выражения, позволяющие синтезировать модели с заданными свойствами по функции распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек моделируемого объекта.

2.2.1. *Четырехточечная модель*

Первым очевидным шагом является увеличение числа излучающих точек до четырех. Расположим излучатели согласно Рисунку 2.4. Излучающие точки удалены на равное расстояние от начала координат (точки O). Угол $\psi \in (0, \pi/2)$.

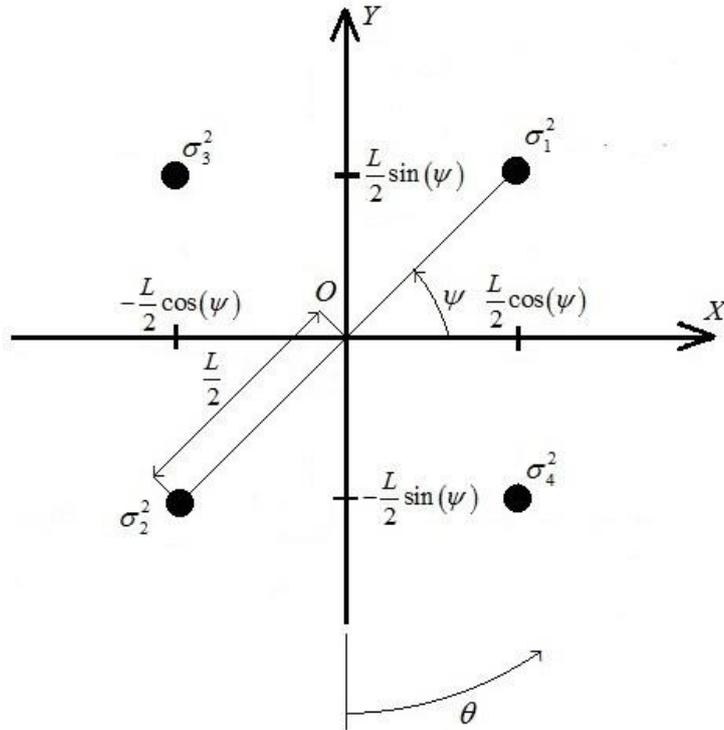


Рисунок 2.4. Расположение четырех излучающих точек на плоскости.

Функция распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек:

$$F_r(x, y) = \sigma_1^2 \delta(y - l_s) \delta(x - l_c) + \sigma_2^2 \delta(x + l_c) \delta(y + l_s) + \quad (2.18)$$

$$+ \sigma_3^2 \delta(x + l_c) \delta(y - l_s) + \sigma_4^2 \delta(x - l_c) \delta(y + l_s),$$

где $l_c = \frac{L}{2} \cos \psi$, $l_s = \frac{L}{2} \sin \psi$.

Положение излучателей вдоль обобщенной координаты γ для произвольного θ из диапазона $(-\pi/2, \pi/2)$ показано на Рисунке 2.5. При углах визирования поверхности $\theta = 0, \pm\pi, \pm\pi/2$ модель сводится к двухточечной. При углах визирования $\theta = \pm\psi, \pm(\pi/2 + \psi)$ модель сводится к трехточечной. Для углов визирования, отличающихся от указанных, модель содержит все четыре излучающих точки неэквидистантно расположенных вдоль обобщенной координаты.

Математическое ожидание ПРВ ШК можно определить по выражениям (1.9) и (2.18):

$$m_\gamma = \frac{L \left(\sigma_4^2 - \sigma_3^2 \right) \cos(\psi + \theta) + \left(\sigma_1^2 - \sigma_2^2 \right) \cos(\psi - \theta)}{2 \left(\sigma_2^2 + \sigma_3^2 \right) + \left(\sigma_4^2 + \sigma_1^2 \right)}. \quad (2.19)$$

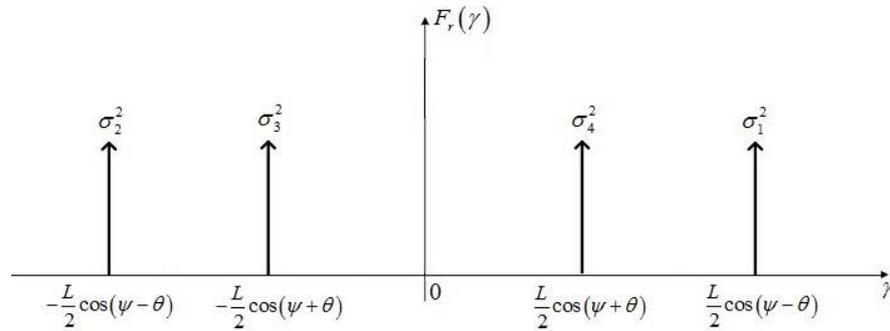


Рисунок 2.5. Функция распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек.

Параметр μ_γ равен:

$$\begin{aligned} \mu_\gamma^2 &= \frac{\sigma_H^2}{\frac{L^2}{4} \left[\left(\sigma_3^2 + \sigma_4^2 \right) \cos^2(\psi + \theta) + \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 \right) \cos^2(\psi - \theta) \right] - m^2 \sigma_H^2} = (2.20) \\ &= \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}{\frac{L^2}{4} \left[\left(\left(\sigma_3^2 + \sigma_4^2 \right) \cos^2(\psi + \theta) + \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 \right) \cos^2(\psi - \theta) \right) - \right.} \\ &\quad \left. \frac{\left[\left(\sigma_4^2 - \sigma_3^2 \right) \cos(\psi + \theta) + \left(\sigma_1^2 - \sigma_2^2 \right) \cos(\psi - \theta) \right]^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \right]}. \end{aligned}$$

Определим параметры ПРВ ШК при визировании вдоль координатных осей по (2.19) и (2.20):

$$m_Y = l_c \frac{\sigma_{14}^2 - \sigma_{23}^2}{\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2}; \quad m_X = l_s \frac{\sigma_{24}^2 - \sigma_{13}^2}{\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2};$$

$$\mu_Y^2 = \frac{\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2}{l_c^2 \left[\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2 - \frac{(\sigma_{14}^2 - \sigma_{23}^2)^2}{\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2} \right]}; \quad \mu_X^2 = \frac{\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2}{l_s^2 \left[\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2 - \frac{(\sigma_{24}^2 - \sigma_{13}^2)^2}{\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2} \right]},$$

где $\sigma_{14}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_4^2$; $\sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2$; $\sigma_{24}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_4^2$; $\sigma_{13}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2$.

Таким образом, увеличение числа излучающих точек позволяет независимо управлять параметрами ПРВ ШК при рассмотрении моделируемой поверхности вдоль разных осей. Например, положение КЦИ относительно оси ОУ зависит от сумм мощностей $\sigma_1^2 + \sigma_3^2$ и $\sigma_2^2 + \sigma_4^2$, но при этом не зависит от их соотношений σ_1^2/σ_3^2 и σ_2^2/σ_4^2 . Поэтому «перекачивая» мощности в парах точек 1-3 и 2-4, можно установить нужное положение КЦИ относительно оси ОУ, сохранив при этом заданное положение КЦИ относительно оси ОХ. Однако, поскольку рассматриваемая модель при визировании вдоль осей координат сводится к двухточечной, ей присущи также недостатки этой модели: невозможно независимое управление параметрами ПРВ ШК m_γ и μ_γ .

Получим уравнения, позволяющие синтезировать четырехточечную модель (т.е. определить мощности излучателей модели, расстояние между излучателями), которая при визировании вдоль координатных осей обеспечивает заданные параметры ПРВ ШК.

Считая заданными значения L , ψ и $\sigma_\Sigma^2 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i^2$ необходимо разрешить систему уравнений (2.21). Так как модель не позволяет независимо управлять значениями m_γ и μ_γ , возможно установить лишь требуемые значения одного из параметров вдоль двух ортогональных осей. Синтез такой модели можно осуществить по выражениям (2.22) - (2.23).

$$\left\{ \begin{array}{l} m_X = \frac{L(\sigma_{14}^2 - \sigma_{23}^2)\cos(\psi)}{2(\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2)} \\ m_Y = \frac{L(\sigma_{24}^2 - \sigma_{13}^2)\sin(\psi)}{2(\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2)} \\ \mu_X^2 = \frac{\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2}{\frac{L^2}{4} \left[(\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2)\cos^2(\psi) - \frac{(\sigma_{14}^2 - \sigma_{23}^2)^2 \cos^2(\psi)}{\sigma_{14}^2 + \sigma_{23}^2} \right]} \\ \mu_Y^2 = \frac{\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2}{\frac{L^2}{4} \left[(\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2)\sin^2(\psi) - \frac{(\sigma_{24}^2 - \sigma_{13}^2)^2 \sin^2(\psi)}{\sigma_{24}^2 + \sigma_{13}^2} \right]} \end{array} \right. \cdot (2.21)$$

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{2} \left(\frac{m_Y}{l_c} - \frac{m_X}{l_s} \right), \quad \sigma_4^2 - \sigma_3^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{2} \left(\frac{m_Y}{l_c} + \frac{m_X}{l_s} \right), \quad (2.22)$$

$$\mu_Y(m_Y) = \frac{1}{\sqrt{l_c^2 - m_Y^2}}, \quad \mu_X(m_X) = \frac{1}{\sqrt{l_s^2 - m_X^2}}.$$

$$\sigma_3^2 + \sigma_4^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{l_c^2 \mu_Y^2}} + \sqrt{1 - \frac{1}{l_s^2 \mu_X^2}} \right), \quad (2.23)$$

$$\sigma_2^2 - \sigma_1^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{l_s^2 \mu_X^2}} - \sqrt{1 - \frac{1}{l_c^2 \mu_Y^2}} \right),$$

$$m_Y(\mu_Y) = \sqrt{l_c^2 - \mu_Y^2}, \quad m_X(\mu_X) = \sqrt{l_s^2 - \mu_X^2}.$$

2.2.2. Четырехточечная модель с инвариантными свойствами

Определим условия, гарантирующие инвариантность параметров ПРВ ШК четырехточечной модели к углу визирования.

Пусть к излучающим точкам модели подводятся сигналы с равными мощностями, то есть $\sigma_i^2 = \sigma^2$ для $i=1,2,3,4$.

Из выражений (2.19), (2.20) следует:

$$m_\gamma = \frac{L(\sigma^2 - \sigma'^2)\cos(\psi + \theta) + (\sigma^2 - \sigma'^2)\cos(\psi - \theta)}{4\sigma^2} = 0,$$

$$\mu_\gamma^2 = \frac{4}{L^2 \left[(\cos(\psi)\cos(\theta))^2 + (\sin(\psi)\sin(\theta))^2 \right]}.$$

При $\psi = \pi/4$:

$$\mu_\gamma^2 = \frac{8}{L^2 [\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)]} = \frac{8}{L^2}. \quad (2.24)$$

Таким образом, при расположении излучателей в вершинах квадрата получаем не зависящие от угла визирования параметры распределения ШК (а именно, математическое ожидание $m_\gamma = 0$, а параметр $\mu_\gamma^2 = 8/L^2$).

Построение такой модели сводится к расположению излучающих точек в вершинах квадрата, стороны которого равны:

$$L' = \frac{L}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\mu_\gamma}. \quad (2.25)$$

Мощности сигналов, подводимых к излучателям, принимаются равными.

2.2.3. Пятиточечная модель

Как было показано, модель с четырьмя излучающими точками не допускает независимого управления параметрами ПРВ ШК. Для того, чтобы обеспечить такую возможность добавим дополнительный излучатель, расположенный в центре (Рисунок 2.6).

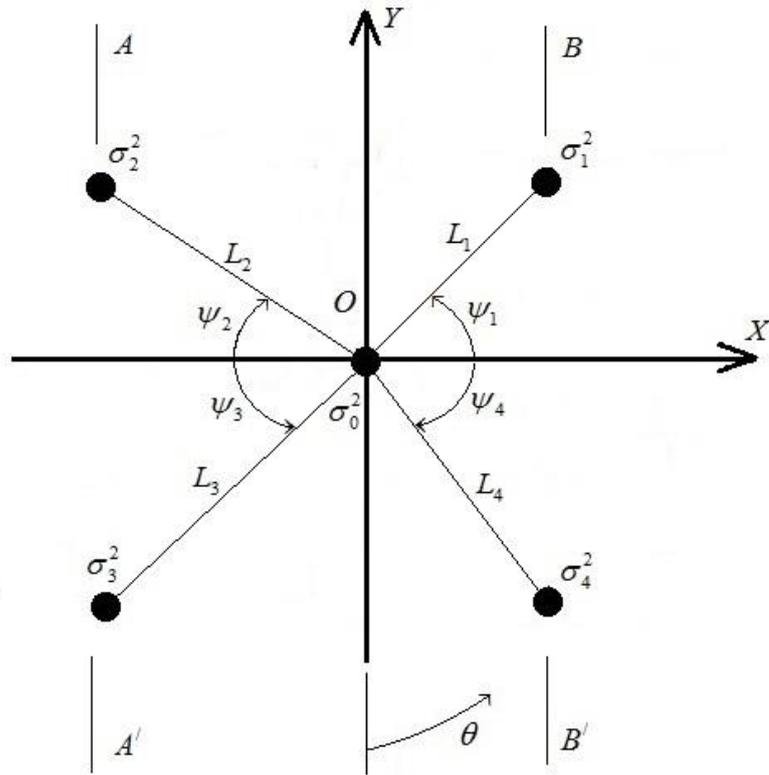


Рисунок 2.6. Расположение пяти излучающих точек на плоскости

Функцию распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 F_r(x, y) = & \sigma_0^2 \delta(x) \delta(y) + \sigma_1^2 \delta(x - L_1 \cos \psi_1) \delta(y - L_1 \sin \psi_1) + \\
 & + \sigma_2^2 \delta(x + L_2 \cos \psi_2) \delta(y - L_2 \sin \psi_2) + \sigma_3^2 \delta(x + L_3 \cos \psi_3) \delta(y + L_3 \cos \psi_3) + \\
 & + \sigma_4^2 \delta(x - L_4 \cos \psi_4) \delta(y + L_4 \cos \psi_4).
 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Положение излучателей №1-4 на плоскости определяется расстояниями $L_1 - L_4$ и углами $\psi_1 - \psi_4$. При этом необходимо соблюсти следующие соотношения:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1}; \quad \frac{L_1}{L_4} = \frac{\cos \psi_4}{\cos \psi_1}; \quad \frac{L_2}{L_3} = \frac{\cos \psi_3}{\cos \psi_2}; \quad \frac{L_3}{L_4} = \frac{\sin \psi_4}{\sin \psi_3}. \quad (2.27)$$

Излучатель № 0 всегда расположен в начале координат. Остальные излучателя располагаются так как указано на Рисунке 2.5.

Математическое ожидание ПРВ ШК при визировании модели под углом $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$:

$$m_\gamma = \frac{\sigma_1^2 L_1 \cos(\psi_1 - \theta) - \sigma_3^2 L_3 \cos(\psi_3 - \theta) + \dots}{\sum_{i=0}^4 \sigma_i^2} \dots \quad (2.28)$$

$$\dots \frac{+ \sigma_4^2 L_4 \cos(\psi_4 + \theta) - \sigma_2^2 L_2 \cos(\psi_2 + \theta)}{\dots}.$$

Параметр μ_γ^2 равен:

$$\mu_\gamma^2 = \frac{\sum_{i=0}^4 \sigma_i^2}{\sigma_1^2 L_1^2 \cos^2(\psi_1 - \theta) + \sigma_3^2 L_3^2 \cos^2(\psi_3 - \theta) + \sigma_4^2 L_4^2 \cos^2(\psi_4 + \theta) + \dots} \dots \quad (2.29)$$

$$\dots \frac{+ \sigma_2^2 L_2^2 \cos^2(\psi_2 + \theta) - m^2 \sigma_H^2}{\sum_{i=0}^4 \sigma_i^2} =$$

$$= \frac{\dots}{\sigma_1^2 L_1^2 \cos^2(\psi_1 - \theta) + \sigma_3^2 L_3^2 \cos^2(\psi_3 - \theta) + \sigma_4^2 L_4^2 \cos^2(\psi_4 + \theta) + \sigma_2^2 L_2^2 \cos^2(\psi_2 + \theta) - \dots}$$

$$\dots \frac{\left(\sigma_1^2 L_1 \cos(\psi_1 - \theta) - \sigma_3^2 L_3 \cos(\psi_3 - \theta) + \sigma_4^2 L_4 \cos(\psi_4 + \theta) - \sigma_2^2 L_2 \cos(\psi_2 + \theta) \right)^2}{\sum_{i=0}^4 \sigma_i^2}.$$

При визировании модели вдоль оси OX ($\theta=0$) и оси OY ($\theta=-\pi/2$), учитывая соотношения (2.27), получим следующие значения параметров распределения:

$$m_X = \frac{\sigma_{14}^2 L_1 \cos \psi_1 - \sigma_{23}^2 L_2 \cos \psi_2}{\sigma_\Sigma^2}; m_Y = \frac{\sigma_{34}^2 L_3 \sin \psi_3 - \sigma_{12}^2 L_1 \sin \psi_1}{\sigma_\Sigma^2};$$

$$\mu_X^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma_{14}^2 L_1^2 \cos^2 \psi_1 + \sigma_{23}^2 L_2^2 \cos^2 \psi_2 - \frac{(\sigma_{14}^2 L_1 \cos \psi_1 - \sigma_{23}^2 L_2 \cos \psi_2)^2}{\sigma_\Sigma^2}};$$

$$\mu_Y^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma_{12}^2 L_1^2 \sin^2 \psi_1 + \sigma_{34}^2 L_3^2 \sin^2 \psi_3 - \frac{(\sigma_{34}^2 L_3 \sin \psi_3 - \sigma_{12}^2 L_1 \sin \psi_1)^2}{\sigma_\Sigma^2}},$$

где $\sigma_{14}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_4^2$; $\sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2$; $\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$; $\sigma_{34}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2$; $\sigma_\Sigma^2 = \sum_{i=0}^4 \sigma_i^2$.

Введем следующие обозначения:

$$l_{c1} = L_1 \cos \psi_1, l_{c2} = L_2 \cos \psi_2, l_{s1} = L_1 \sin \psi_1, l_{s3} = L_3 \sin \psi_3.$$

С учетом этого получаем:

$$m_X = \frac{\sigma_{14}^2 l_{c1} - \sigma_{23}^2 l_{c2}}{\sigma_\Sigma^2}; m_Y = \frac{\sigma_{34}^2 l_{s3} - \sigma_{12}^2 l_{s1}}{\sigma_\Sigma^2}; \quad (2.30)$$

$$\mu_X^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma_{14}^2 l_{c1}^2 + \sigma_{23}^2 l_{c2}^2 - \frac{(\sigma_{14}^2 l_{c1} - \sigma_{23}^2 l_{c2})^2}{\sigma_\Sigma^2}}; \mu_Y^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma_{12}^2 l_{s1}^2 + \sigma_{34}^2 l_{s3}^2 - \frac{(\sigma_{34}^2 l_{s3} - \sigma_{12}^2 l_{s1})^2}{\sigma_\Sigma^2}}.$$

Получим выражения, позволяющие синтезировать данную модель.

Считаем, что значения σ_Σ^2 , L_i , ψ_i , $i=1,2...4$ заданы. Тогда решая систему уравнений:

$$\begin{cases} m_X = \frac{\sigma_{14}^2 l_{c1} - \sigma_{23}^2 l_{c2}}{\sigma_\Sigma^2} \\ \mu_X^2 = \frac{\sigma_\Sigma^2}{\sigma_{14}^2 l_{c1}^2 + \sigma_{23}^2 l_{c2}^2 - \frac{(\sigma_{14}^2 l_{c1} - \sigma_{23}^2 l_{c2})^2}{\sigma_\Sigma^2}}, \end{cases}$$

получаем:

$$\frac{\sigma_{23}^2}{\sigma_{\Sigma}^2} = \frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X(l_{c1} - m_Y)}{l_{c2}(l_{c1} + l_{c2})}, \quad (2.31)$$

$$\frac{\sigma_{14}^2}{\sigma_{\Sigma}^2} = \frac{m_X}{l_{c1}} + \frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_Y(l_{c1} - m_Y)}{l_{c1}(l_{c1} + l_{c2})}.$$

Решая систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_Y = \frac{\sigma_{34}^2 l_{s3} - \sigma_{12}^2 l_{s1}}{\sigma_{\Sigma}^2} \\ \mu_Y^2 = \frac{\sigma_{\Sigma}^2}{\sigma_{12}^2 l_{s1}^2 + \sigma_{34}^2 l_{s3}^2 - \frac{(\sigma_{34}^2 l_{s3} - \sigma_{12}^2 l_{s1})^2}{\sigma_{\Sigma}^2}} \end{array} \right.,$$

получаем:

$$\frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{\Sigma}^2} = \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y(l_{s3} - m_X)}{l_{s1}(l_{s1} + l_{s3})}, \quad (2.32)$$

$$\frac{\sigma_{34}^2}{\sigma_{\Sigma}^2} = \frac{m_Y}{l_{s3}} + \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y(l_{s3} - m_X)}{l_{s3}(l_{s1} + l_{s3})}.$$

Следовательно, можно записать систему из 5-и уравнений с 5-ю неизвестными σ_i^2 , $i = 0, 1 \dots 4$:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\sigma_2^2 + \sigma_3^2 = \frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X(l_{c1} - m_Y)}{l_{c2}(l_{c1} + l_{c2})} (\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2) \\
\sigma_1^2 + \sigma_4^2 = \left(\frac{m_X}{l_{c1}} + \frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X(l_{c1} - m_Y)}{l_{c1}(l_{c1} + l_{c2})} \right) (\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2) \\
\sigma_1^2 + \sigma_2^2 = \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y(l_{s3} - m_X)}{l_{s1}(l_{s1} + l_{s3})} (\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2) \\
\sigma_3^2 + \sigma_4^2 = \left(\frac{m_Y}{l_{s3}} + \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y(l_{s3} - m_X)}{l_{s3}(l_{s1} + l_{s3})} \right) (\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2) \\
\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 = \sigma_\Sigma^2
\end{array} \right. \quad (2.33)$$

Введем обозначения:

$$A = -\frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X(l_{c1} - m_Y)}{l_{c2}(l_{c1} + l_{c2})}, \quad B = -\left(\frac{m_X}{l_{c1}} + \frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X(l_{c1} - m_Y)}{l_{c1}(l_{c1} + l_{c2})} \right),$$

$$C = -\frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y(l_{s3} - m_X)}{l_{s1}(l_{s1} + l_{s3})}, \quad D = -\left(\frac{m_Y}{l_{s3}} + \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y(l_{s3} - m_X)}{l_{s3}(l_{s1} + l_{s3})} \right).$$

С учетом введенных обозначений получаем СЛАУ из 5 уравнений:

$$\begin{cases} A\sigma_0^2 + A\sigma_1^2 + (1+A)\sigma_2^2 + (1+A)\sigma_3^2 + A\sigma_4^2 = 0 \\ B\sigma_0^2 + (1+B)\sigma_1^2 + B\sigma_2^2 + B\sigma_3^2 + (1+B)\sigma_4^2 = 0 \\ C\sigma_0^2 + (1+C)\sigma_1^2 + (1+C)\sigma_2^2 + C\sigma_3^2 + C\sigma_4^2 = 0 \\ D\sigma_0^2 + D\sigma_1^2 + D\sigma_2^2 + (1+D)\sigma_3^2 + (1+D)\sigma_4^2 = 0 \\ \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 = \sigma_\Sigma^2 \end{cases}$$

Согласно методу Крамера:

$$\sigma_i^2 = \frac{\Delta_i}{\Delta}, \quad i = 0, 1, \dots, 4,$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} A & A & 1+A & 1+A & A \\ B & 1+B & B & B & 1+B \\ C & 1+C & 1+C & C & C \\ D & D & D & 1+D & 1+D \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Равенство нулю последнего определителя означает, что СЛАУ является неопределенной, т.е. имеет более одного решения.

Введем обозначения:

$$v_i = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_\Sigma^2}, \quad i = 0, 1, \dots, 4$$

После простейших преобразований системы уравнений (2.33) получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 v_1 - v_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{m_X}{l_{c1}} - \frac{m_Y}{l_{s3}} + \frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X (l_{c1} - m_X)}{(l_{c1} + l_{c2})} \left(\frac{1}{l_{c1}} - \frac{1}{l_{c2}} \right) + \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y (l_{s3} - m_Y)}{(l_{s1} + l_{s3})} \left(\frac{1}{l_{s1}} - \frac{1}{l_{s3}} \right) \right] \\
 v_2 - v_4 = \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{1}{\mu_X^2} - m_X (l_{c1} - m_X)}{(l_{c1} + l_{c2})} \left(\frac{1}{l_{c2}} - \frac{1}{l_{c1}} \right) + \frac{\frac{1}{\mu_Y^2} - m_Y (l_{s3} - m_Y)}{(l_{s1} + l_{s3})} \left(\frac{1}{l_{s1}} - \frac{1}{l_{s3}} \right) - \frac{m_X}{l_{c1}} - \frac{m_Y}{l_{s3}} \right] \\
 v_0 + v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = 1
 \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Таким образом, полученная система уравнений имеет бесконечное число решений. Требуемые значения параметров ПРВ ШК могут быть получены путем обеспечения заданной разницы мощностей сигналов соответствующих излучателей модели.

Мощность сигнала, подводимого к центральному излучателю, оказывает влияние на параметры ПРВ ШК по обеим координатам. В результате возникает ограничение на область независимого управления этими параметрами.

Нетрудно убедиться, что при визировании вдоль одной из осей координат модель сводится к трехточечной, что позволяет определить границы области независимого управления параметрами ПРВ ШК по выражениям, полученным в [31].

При визировании вдоль оси OX имеем:

$$\mu_{X \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_X - L_1 \cos \psi_1)(m_X - L_2 \cos \psi_2)}}, \quad (2.35)$$

$$\mu_{X \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X - L_2 \cos \psi_2)}}, \quad \mu_{X \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X - L_1 \cos \psi_1)}}.$$

При визировании вдоль оси OY имеем:

$$\begin{aligned} \mu_{Y \min} &= \frac{1}{\sqrt{-(m_Y - L_3 \sin \psi_3)(m_Y - L_1 \sin \psi_1)}}, \\ \mu_{Y \max 1} &= \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y - L_1 \sin \psi_1)}}, \quad \mu_{Y \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y - L_3 \sin \psi_3)}}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

2.2.4. Пятиточечная модель с инвариантными свойствами

Определим условия, гарантирующие инвариантность параметров ПРВ ШК пятиточечной модели к углу визирования в азимутальной плоскости.

Рассмотрим частный случай равных мощностей излучателей модели. Пусть $\sigma_i^2 = \sigma^2$ для $i = 0, 1, \dots, 4$. Из выражений (2.28), (2.29) следует:

$$m_\gamma = \frac{L(\sigma^2 - \sigma^2)\cos(\psi + \theta) + (\sigma^2 - \sigma^2)\cos(\psi - \theta)}{5\sigma^2} = 0,$$

$$\mu_\gamma^2 = \frac{10}{L^2 \left[(\cos(\psi)\cos(\theta))^2 + (\sin(\psi)\sin(\theta))^2 \right]}.$$

При $\psi = \pi/4$:

$$\mu_\gamma^2 = \frac{20}{L^2 [\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)]} = \frac{20}{L^2}. \quad (2.37)$$

Таким образом, при расположении излучателей в вершинах квадрата получаем не зависящие от угла визирования параметры распределения ШК (а именно, математическое ожидание $m_\gamma = 0$, а параметр $\mu_\gamma^2 = 20/L^2$).

Пусть мощность центрального излучателя отличается от мощностей всех остальных излучателей, которые полагаем равными: $\sigma_i^2 = \sigma^2$ для

$i=1,2,3,4$. В этом случае выражения для параметров ПРВ ШК принимают вид (при расположении излучающих точек в вершинах квадрата):

$$m_\gamma = \frac{L}{2} \frac{(\sigma^2 - \sigma_0^2) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) + (\sigma^2 - \sigma_0^2) \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right)}{4\sigma^2 + \sigma_0^2} = 0, \quad (2.38)$$

$$\mu_\gamma^2 = \frac{4\sigma^2 + \sigma_0^2}{\frac{L^2}{4} 2\sigma^2 \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) + \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \right]} = \frac{4}{L^2} \left(4 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2 \right).$$

Как видно из полученных выражений параметр μ_γ инвариантен к углу визирования модели в азимутальной плоскости. Изменяя мощность сигнала только центрального излучателя σ_0^2 , можно управлять эффективной «шириной» ПРВ ШК.

Получим уравнения, позволяющие синтезировать 5-точечную модель с инвариантными свойствами. В случае равенства мощностей всех излучающих точек построение такой модели сводится к расположению излучателей в вершинах квадрата с центральной точкой. Размер стороны квадрата определяется соотношением:

$$L' = \frac{L}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{10}}{\mu}. \quad (2.39)$$

В случае если имеется ограничение на L требуемых параметров ПРВ ШК можно добиться устанавливая соотношение между мощностями сигналов центрального излучателя и остальных:

$$\frac{\sigma_0^2}{\sigma^2} = \frac{\mu^2 L^2}{4} - 4. \quad (2.40)$$

2.2.5. Девятиточечная модель

Дальнейшее увеличение количества излучателей позволяет получить модель, позволяющую полностью «развязать» параметры ПРВ ШК, относящиеся к двум ортогональным осям координат.

Рассмотрим следующую конфигурацию (Рисунок 2.7).

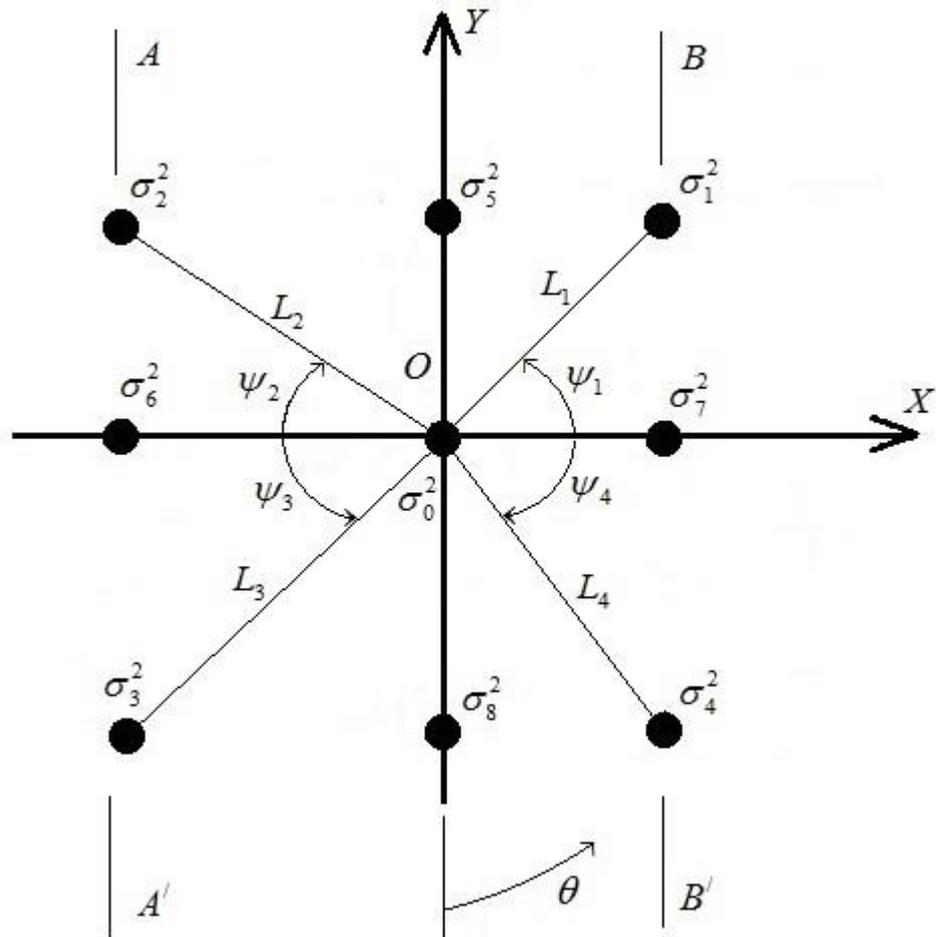


Рисунок 2.7. Расположение 9-ти излучающих точек на плоскости.

Функцию распределения плотности интенсивности сигналов излучающих точек можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
F_r(x, y) = & \sigma_0^2 \delta(x) \delta(y) + \sigma_1^2 \delta(x - L_1 \cos \psi_1) \delta(y - L_1 \sin \psi_1) + \\
& + \sigma_2^2 \delta(x + L_2 \cos \psi_2) \delta(y - L_2 \sin \psi_2) + \sigma_3^2 \delta(x + L_3 \cos \psi_3) \delta(y + L_3 \cos \psi_3) + \\
& + \sigma_4^2 \delta(x - L_4 \cos \psi_4) \delta(y + L_4 \cos \psi_4) + \sigma_5^2 \delta(x) \delta(y - L_1 \sin \psi_1) + \\
& + \sigma_6^2 \delta(x + L_2 \cos \psi_2) \delta(y) + \sigma_7^2 \delta(x - L_1 \cos \psi_1) \delta(y) + \sigma_8^2 \delta(x) \delta(y + L_3 \cos \psi_3)
\end{aligned} \tag{2.41}$$

При такой конфигурации три излучающих точки расположены вдоль линии параллельной оси ОХ (на Рисунке 2.7 следующие тройки излучателей – (№1, №2, №5 – линия отстоит на $L_1 \sin(\psi_1)$ от оси ОХ), (№3, №4, №8 – линия отстоит на $L_4 \sin(\psi_4)$ от оси ОХ), (№0, №6, №7 – линия совпадает с осью ОХ)). По три излучающих точки расположено в линию также относительно оси ОУ ((№1, №4, №7 – линия BB' отстоит на $L_1 \cos(\psi_1)$ от оси ОУ), (№2, №3, №6 – линия AA' отстоит на $L_2 \cos(\psi_2)$ от оси ОУ), (№0, №5, №8 – линия совпадает с осью ОУ)).

Положение излучателей №1-4 на плоскости определяется расстояниями $L_1 - L_4$ и углами $\psi_1 - \psi_4$. При этом необходимо соблюсти следующие соотношения:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1}; \quad \frac{L_1}{L_4} = \frac{\cos \psi_4}{\cos \psi_1}; \quad \frac{L_2}{L_3} = \frac{\cos \psi_3}{\cos \psi_2}; \quad \frac{L_3}{L_4} = \frac{\sin \psi_4}{\sin \psi_3}. \tag{2.42}$$

Излучатель №0 всегда расположен в начале координат. Остальные излучателя располагаются так, как указано на Рисунке 2.7

В общем случае при визировании поверхности под углом $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ функция распределения интенсивностей излучающих точек приобретает вид, показанный на Рисунке 2.8.

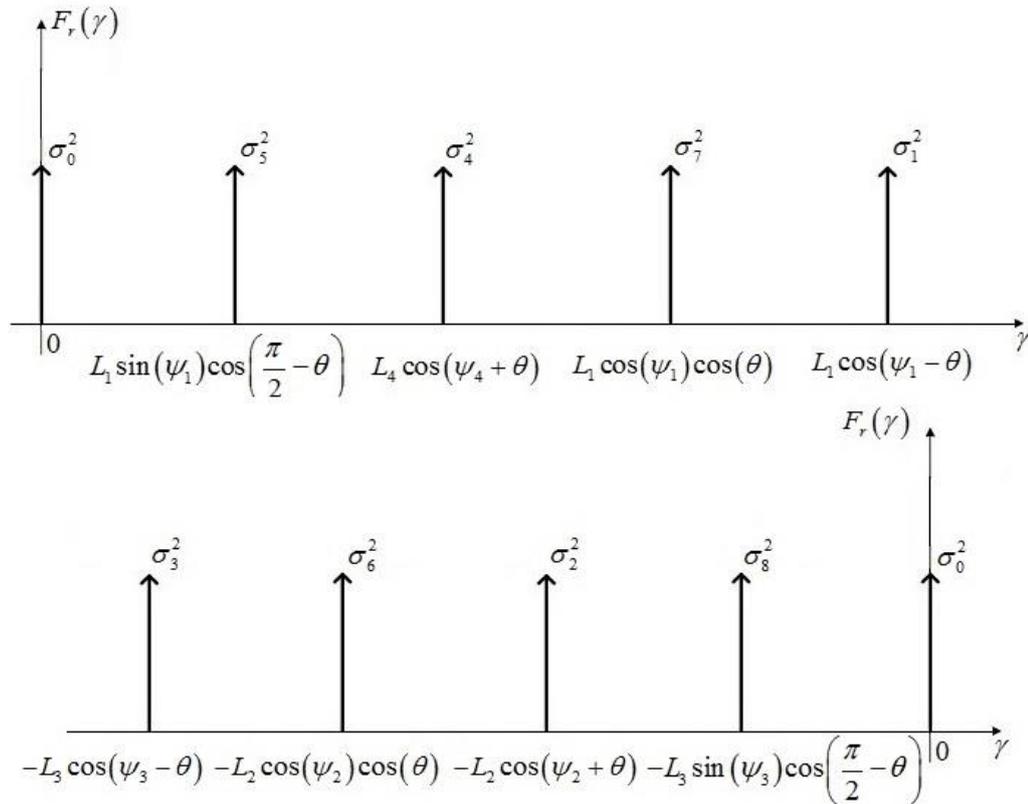


Рисунок 2.8. Функция распределения интенсивности сигналов излучающих точек модели при угле визирования $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$.

При некоторых углах визирования количество излучающих точек может сокращаться (за счет того, что излучение некоторых точек сливается, т.е. воспринимаются РЛС как одна излучающая точка с суммарной интенсивностью излучения). В частности, при визировании вдоль осей координат ($\theta = 0, -\pi/2$), рассматриваемая модель сводится к трехточечной.

Математическое ожидание ПРВ ШК при визировании модели под углом $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$:

$$m_\gamma = \frac{\sigma_1^2 L_1 \cos(\psi_1 - \theta) - \sigma_3^2 L_3 \cos(\psi_3 - \theta) + \sigma_4^2 L_4 \cos(\psi_4 + \theta) - \sigma_2^2 L_2 \cos(\psi_2 + \theta) + \sum_{i=0}^8 \sigma_i^2}{\sigma_7^2 L_1 \cos(\psi_1) - \sigma_6^2 L_2 \cos(\psi_2)} \cos(\theta) + \frac{\sigma_5^2 L_1 \sin(\psi_1) - \sigma_8^2 L_3 \sin(\psi_3)}{\sigma_7^2 L_1 \cos(\psi_1) - \sigma_6^2 L_2 \cos(\psi_2)} \sin(\theta) \quad (2.43)$$

Параметр μ_γ :

$$\mu_\gamma^2 = \frac{\sum_{i=0}^8 \sigma_i^2}{\sigma_1^2 L_1^2 \cos^2(\psi_1 - \theta) + \sigma_3^2 L_3^2 \cos^2(\psi_3 - \theta) + \sigma_4^2 L_4^2 \cos^2(\psi_4 + \theta) + \sigma_2^2 L_2^2 \cos^2(\psi_2 + \theta) + [\sigma_7^2 L_1^2 \cos^2(\psi_1) + \sigma_6^2 L_2^2 \cos^2(\psi_2)] \cos^2(\theta) + [\sigma_5^2 L_1^2 \sin^2(\psi_1) + \sigma_8^2 L_3^2 \sin^2(\psi_3)] \sin^2(\theta) - m^2 \sigma_H^2}. \quad (2.44)$$

При визировании модели поверхности вдоль оси OY ($\theta=0$) и оси OX ($\theta=-\pi/2$), учитывая соотношения (2.42), получим следующие значения параметров распределения:

$$m_Y = \frac{\sigma_{147}^2 L_1 \cos \psi_1 - \sigma_{236}^2 L_2 \cos \psi_2}{\sigma_{147}^2 + \sigma_{058}^2 + \sigma_{236}^2}; \quad m_X = \frac{\sigma_{348}^2 L_3 \sin \psi_3 - \sigma_{125}^2 L_1 \sin \psi_1}{\sigma_{348}^2 + \sigma_{067}^2 + \sigma_{125}^2};$$

$$\mu_Y^2 = \frac{\sigma_{147}^2 + \sigma_{058}^2 + \sigma_{236}^2}{\sigma_{147}^2 L_1^2 \cos^2 \psi_1 + \sigma_{236}^2 L_2^2 \cos^2 \psi_2 - \frac{(\sigma_{147}^2 L_1 \cos \psi_1 - \sigma_{236}^2 L_2 \cos \psi_2)^2}{\sigma_{147}^2 + \sigma_{058}^2 + \sigma_{236}^2}};$$

$$\mu_X^2 = \frac{\sigma_{348}^2 + \sigma_{067}^2 + \sigma_{125}^2}{\sigma_{125}^2 L_1^2 \sin^2 \psi_1 + \sigma_{348}^2 L_3^2 \sin^2 \psi_3 - \frac{(\sigma_{348}^2 L_3 \sin \psi_3 - \sigma_{125}^2 L_1 \sin \psi_1)^2}{\sigma_{348}^2 + \sigma_{067}^2 + \sigma_{125}^2}},$$

где $\sigma_{147}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_4^2 + \sigma_7^2$; $\sigma_{058}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_5^2 + \sigma_8^2$; $\sigma_{236}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_6^2$;

$\sigma_{125}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_5^2$; $\sigma_{067}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2$; $\sigma_{348}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_8^2$.

Главное достоинство рассматриваемой модели заключается в возможности независимого управления параметрами распределений ШК, получающихся при визировании поверхности вдоль осей координат. Например, при визировании поверхности вдоль оси OY ($\theta=0$) параметры

распределения ШК определяются соотношениями между следующими суммами мощностей сигналов троек излучателей 1-4-7, 0-5-8, 2-3-6. Устанавливая эти соотношения, мы определяем параметры распределения ШК при визировании вдоль оси ОУ. При этом остается возможность изменять соотношения между мощностями в указанных суммах, что не приведет к изменению параметров распределения вдоль оси ОУ, но позволит установить эти параметры по другой координатной оси. Кроме того, для предложенной конфигурации излучающих точек возможно смещения линий излучателей BB' и AA' (см. рис. 2.7) относительно оси ОУ, что приведет к изменению параметров распределения при визировании поверхности вдоль оси ОУ, но не изменит соответствующие параметры при визировании по другой оси.

Таким образом, рассмотренная девятиточечная геометрическая модель представляет большой интерес для задач имитации отражений от двумерных распределенных объектов, поскольку позволяет путем изменения соотношений между мощностями сигналов, подводимых к излучающим точкам, управлять положением и угловыми размерами распределенного объекта по взаимно перпендикулярным осям независимо друг от друга.

2.2.6. Девятиточечная модель с инвариантными свойствами

Аналогично пунктам 2.2.2 и 2.2.4, может быть получена модель с инвариантными относительно угла визирования в азимутальной плоскости параметрами распределения ШК.

При равных мощностях сигналов излучателей модели и при расположении излучателей на плоскости в форме квадрата выражения (2.43), (2.44) имеют вид:

$$m_{\gamma} = \frac{\sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) - \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) + \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) - \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right)}{9\sigma^2}$$

$$\frac{+ \left[\sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \cos(\theta) + \left[\sigma^2 L \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \sigma^2 L \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \sin(\theta)}{=} = 0$$

$$\mu_\gamma^2 = \frac{9\sigma^2}{2\sigma^2 L^2 \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) + \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \right] + \sigma^2 L^2} = \frac{3}{L^2}.$$

Пусть мощность сигнала центрального излучателя отличается от мощностей сигналов всех остальных излучателей, которые полагаем равными: $\sigma_i^2 = \sigma^2$ для $i = 1, 2, \dots, 8$. В этом случае выражения для параметров ПРВ ШК принимают вид (при расположении излучающих точек в вершинах квадрата):

$$m_\gamma = \frac{\sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) - \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) + \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) - \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) +}{8\sigma^2 + \sigma_0^2}$$

$$+ \frac{\left[\sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \sigma^2 L \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \cos(\theta) + \left[\sigma^2 L \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \sigma^2 L \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \sin(\theta)}{=} = 0$$

$$\mu_\gamma^2 = \frac{8\sigma^2 + \sigma_0^2}{2\sigma^2 L^2 \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) + \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \right] + \sigma^2 L^2} = \frac{1}{3L^2} \left(8 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2 \right).$$

Как видно из полученных выражений, параметр μ_γ инвариантен к углу визирования модели. Изменяя мощность только центрального излучателя σ_0^2 , можно управлять эффективной «шириной» ПРВ ШК.

Получим уравнения, позволяющие синтезировать 9-точечную модель с инвариантными свойствами. В случае равенства мощностей всех излучающих точек построение такой модели сводится к расположению излучателей в вершинах квадрата с центральной точкой. Размер стороны квадрата определяется соотношением:

$$L' = \frac{2L}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\mu_\gamma}. \quad (2.45)$$

В случае если имеется ограничение на L требуемых параметров ПРВ ШК можно добиться устанавливая соотношение между мощностями сигналов центрального и остальных излучателей:

$$\frac{\sigma_0^2}{\sigma^2} = 3\mu_\gamma^2 L^2 - 8. \quad (2.46)$$

Выводы:

1. Проанализированы свойства ряда конфигураций геометрических моделей, содержащих 4, 5 и 9 излучателей. Получены соотношения для расчета параметров ПРВ ШК при различных углах визирования для каждой из моделей.

2. Показано, что модели с 5-ю и 9-ю излучателями позволяют независимо управлять параметрами ПРВ ШК μ_γ и m_γ по двум угловым координатам. При этом модель с 9-ю излучателями удобна тем, что позволяет обеспечивать требуемое распределение ШК относительно двух угловых координат за счет перемещения троек излучателей и изменения мощностей сигналов соответствующих излучателей.

3. Получены соотношения для синтеза моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ ШК вдоль двух ортогональных направлений визирования.

4. Показано, что рассмотренные модели позволяют получить инвариантные к углу визирования в азимутальной плоскости параметры распределения ШК.

5. Получены соотношения для синтеза инвариантных к углу визирования моделей, обеспечивающих заданное значение ширины распределения ШК. При это требуемое значение параметра μ_γ может быть

получено как путем перемещения излучателей, так и за счет изменения соотношения мощностей их сигналов.

2.3. Условия инвариантности конфигурации двумерной N -точечной модели к углу визирования

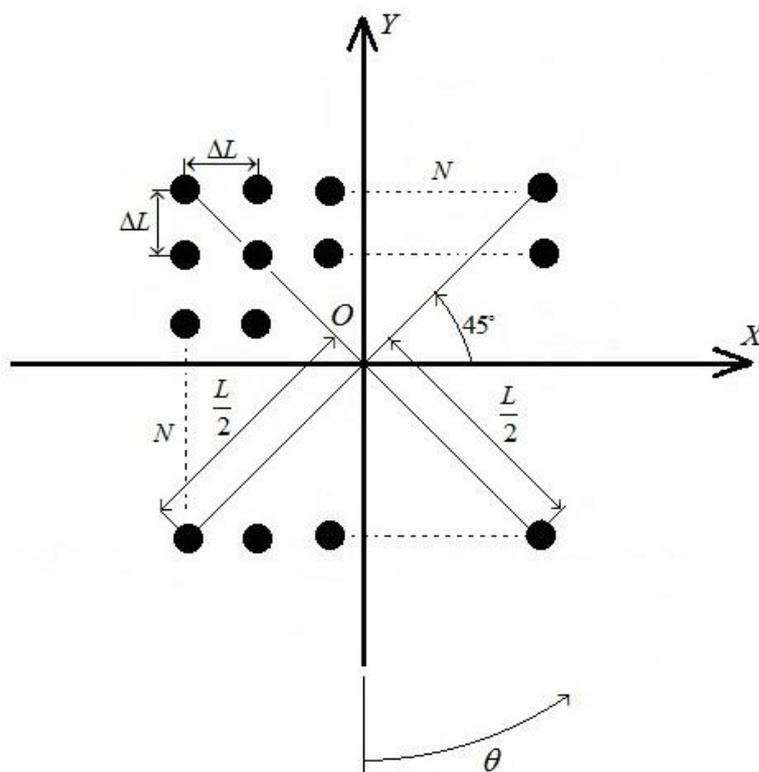


Рисунок 2.9. Расположение $N*N$ излучающих точек на плоскости

В соответствии с Рисунком 2.9, излучающие точки расположены в квадратной области с размером диагонали L . Расстояние между соседними излучателями по оси X и оси Y одинаково и равно $\Delta L = L/(\sqrt{2}N)$. Мощности сигналов излучающих точек одинаковы и равны σ^2 . Определим параметры распределения ШК для такой конфигурации излучателей. Воспользуемся соотношениями (1.9) - (1.10).

$$m_\gamma = \frac{\int_y \gamma F_r(\gamma) d\gamma}{\int_y F_r(\gamma) d\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{N^2} \sigma_i^2 \gamma_i(\theta)}{\sum_{i=1}^{N^2} \sigma_i^2} = \frac{\sigma^2 \sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i(\theta)}{N^2 \sigma^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i(\theta)}{N^2}, \quad (2.47)$$

где $\gamma_i(\theta)$ - положение i -го излучателя на прямой, перпендикулярной линии визирования модели поверхности.

При изменении угла визирования модели поверхности положение i -го излучателя на прямой перпендикулярной линии визирования можно определить в соответствие с правилом пересчета координат при повороте координатных осей [1]:

$$\gamma_i(\theta) = x_i \cos(\theta) + y_i \sin(\theta),$$

где x_i, y_i - координаты расположения i -го излучателя на плоскости.

Рассмотрим сумму в числителе выражения (2.47):

$$\sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i(\theta) = \sum_{i=1}^{N^2} (x_i \cos(\theta)) + \sum_{i=1}^{N^2} (y_i \sin(\theta)) = \cos(\theta) \sum_{i=1}^{N^2} x_i + \sin(\theta) \sum_{i=1}^{N^2} y_i.$$

Поскольку излучающие точки расположены симметрично относительно координатных осей:

$$\sum_{i=1}^{N^2} x_i = \sum_{i=1}^{N^2} y_i = 0.$$

Следовательно, математическое ожидание распределения ШК при изменении угла визирования постоянно и равно нулю: $m_\gamma = 0$.

При $m_\gamma = 0$ параметр μ_γ определяется следующим выражение:

$$\mu_\gamma = \sqrt{\frac{\int_y F_r(\gamma) d\gamma}{\int_y \gamma^2 F_r(\gamma) d\gamma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N^2} \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^{N^2} \sigma_i^2 \gamma_i^2(\theta)}} = \sqrt{\frac{N^2 \sigma^2}{\sigma^2 \sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i^2(\theta)}} = \sqrt{\frac{N^2}{\sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i^2(\theta)}}. \quad (2.48)$$

Рассмотрим сумму в знаменателе выражения (2.48):

$$\sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i^2(\theta) = \sum_{i=1}^{N^2} (x_i \cos(\theta))^2 + \sum_{i=1}^{N^2} (y_i \sin(\theta))^2 = \cos^2(\theta) \sum_{i=1}^{N^2} x_i^2 + \sin^2(\theta) \sum_{i=1}^{N^2} y_i^2.$$

Поскольку излучающие точки расположены симметрично относительно координатных осей:

$$\sum_{i=1}^{N^2} x_i^2 = \sum_{i=1}^{N^2} y_i^2.$$

В таком случае,

$$\sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i^2(\theta) = \cos^2(\theta) \sum_{i=1}^{N^2} x_i^2 + \sin^2(\theta) \sum_{i=1}^{N^2} x_i^2 = \sum_{i=1}^{N^2} x_i^2 (\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)) = \sum_{i=1}^{N^2} x_i^2$$

Параметр μ_γ при этом равен:

$$\mu_\gamma = \sqrt{\frac{N^2}{\sum_{i=1}^{N^2} \gamma_i^2(\theta)}} = \sqrt{\frac{N^2}{\sum_{i=1}^{N^2} x_i^2}} = \sqrt{\frac{N^2}{N \sum_{i=0}^{N-1} \left(-\frac{L}{2\sqrt{2}} + i\Delta L\right)^2}} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=0}^{N-1} \left(-\frac{L}{2\sqrt{2}} + i\Delta L\right)^2}}. \quad (2.49)$$

Следовательно, параметры распределения ШК при таком расположении излучающих точек не зависят от угла визирования в азимутальной плоскости.

Из представленного выше доказательства очевидно, что условие независимости параметров ПРВ ШК от угла визирования модели сводится к условию равенства мощностей сигналов излучающих точек расположения излучающих точек в виде правильного многоугольника. Последнее условие

будет также выполняться при расположении излучателей в виде круга, правильной четырёхконечной звезды и других. Примеры таких моделей приведены на Рисунке 2.10.

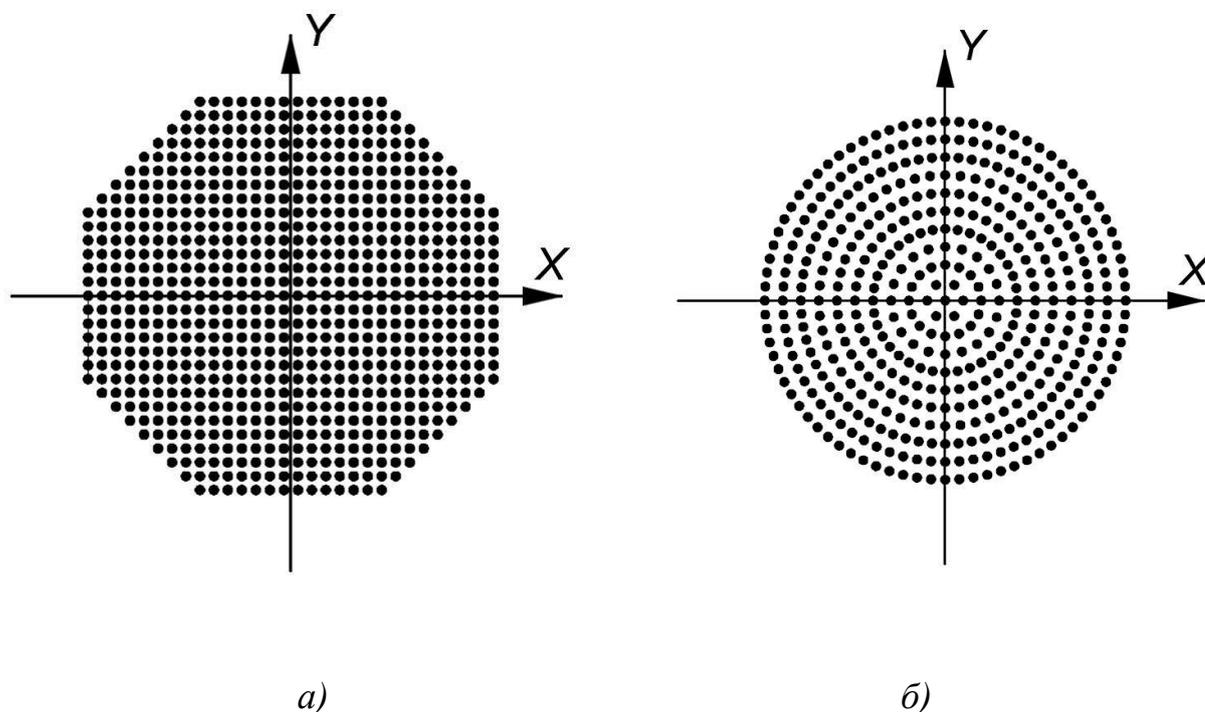


Рисунок 2.10. Модели с инвариантными свойствами

Доказательство инвариантности параметров ПРВ ШК для данных моделей к углу визирования аналогично приведенному выше и сводится к проверке условия расположения излучающих точек в виде правильного многоугольника:

$$\sum_{i=1}^{N^2} x_i = \sum_{i=1}^{N^2} y_i = 0, \quad \sum_{i=1}^{N^2} x_i^2 = \sum_{i=1}^{N^2} y_i^2. \quad (2.50)$$

При изменении угла визирования распределенного объекта в угломестной плоскости изменяется УЭПР. Это означает, что конфигурация замещающей модели остается неизменной, а энергетика сигналов всех излучателей изменяется одинаковым образом (вследствие того, что расстояние между излучателями много меньше дальности до объекта).

Таким образом, получены условия, гарантирующие инвариантность конфигурации N-точечной модели к углу визирования.

2.5. Выводы по второму разделу

1. Показано, что известные геометрические модели с двумя и тремя излучателями не позволяют решить задачу обеспечения заданной ПРВ ШК относительно двух ортогональных направлений визирования. Кроме того, такие модели не позволяют обеспечить инвариантность параметров ПРВ ШК к углу визирования.

2. Предложен ряд конфигураций двумерных геометрических моделей с большим чем три количеством излучателей. Для каждой предложенной модели получены аналитические соотношения, позволяющие по параметрам модели (расположению излучателей и мощностям их сигналов) и заданному углу визирования определить параметры распределения ШК.

3. Показано, что модели с 5-ю и 9-ю излучателями позволяют обеспечить заданную ПРВ ШК относительно двух ортогональных направлений визирования. Получены выражения, позволяющие по функции распределения интенсивности сигналов элементарных отражателей имитируемого объекта синтезировать такие модели.

4. Доказано, что при определенных условиях предложенные модели обладают свойством инвариантности параметров распределения ШК относительно угла визирования в азимутальной плоскости. Получены аналитические выражения, позволяющие по функции распределения интенсивности сигналов элементарных отражателей имитируемого объекта синтезировать модель с инвариантными свойствами.

4. Получены условия, гарантирующие инвариантность геометрии произвольной N-точечной конфигурации излучателей двумерной геометрической модели к углу визирования. Условия сводятся к

расположению излучателей модели в виде правильного многоугольника. При этом мощности сигналов, подводимых к излучателям, должны быть равными (за исключением, в некоторых случаях центрального излучателя).

3. МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Во втором разделе были предложены двумерные геометрические модели, позволяющие достоверно воспроизводить распределение ШК распределенных объектов. Однако, достоверное моделирование ШК не ограничивается только ПРВ. Необходимо обеспечить также достоверное воспроизведение спектрально-корреляционных характеристик ШК. Поэтому возникает задача развития полученных в предыдущем разделе результатов. Для этого необходимо получить математические соотношения и зависимости, позволяющие синтезировать геометрическую модель распределенного объекта с заданными спектрально-корреляционными характеристиками ШК.

Сформулируем задачи, которые должны решаться в данном разделе.

1. Оценить потенциальные возможности предложенных в разделе 2 моделей для моделирования спектрально-корреляционных характеристик ШК.
2. Разработать аппарат синтеза таких моделей на основе заданных функций распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции по поверхности моделируемого объекта
3. Оценить практическую реализуемость таких моделей для сложного распределенного объекта. Рассмотреть возможность декомпозиции такого объекта.

3.1. Спектральный подход к синтезу моделей распределенных объектов

Временные и спектральные характеристики ШК распределенных объектов рассмотрены в ряде работ [16-20, 66-69, 72]. В частности, на основе использования многоточечной модели объекта получены выражения для

корреляционной функции ШК (1.15) и коэффициентов корреляции (1.16–1.21). Можно утверждать, что разработанный математический аппарат является удобным и позволяет решить задачу анализа ШК распределенных объектов. Однако, полностью отсутствует решение задачи синтеза моделей, позволяющих осуществлять имитацию ШК реального распределенного объекта.

В ранее уже упоминавшихся работах [29-38, 91] рассмотрена практическая реализуемость геометрических моделей с учетом спектрально-корреляционных характеристик ШК. Анализировалась двухточечная модель (Рисунок 1.2) и трехточечная модель с неэквилидистантно расположенными излучателями (Рисунок 1.5).

Показано, что двухточечная модель может обеспечить моделирование спектрально-корреляционных характеристик ШК распределенных объектов только в том случае, если коэффициенты корреляции (1.16–1.21) ШК реального объекта связаны линейными соотношениями:

$$r_{H\infty}(\tau) + a_r r_{B\infty}(\tau) + b_r r_{BH\infty}(\tau) = 0, \quad (3.1)$$

$$s_{H\infty}(\tau) + a_r s_{B\infty}(\tau) + b_r s_{BH\infty}(\tau) = 0,$$

где a_r , b_r – некоторые постоянные, определяемые координатами излучателей модели и мощностями их сигналов.

При этом коэффициенты корреляции должны также удовлетворять условиям физической реализуемости:

$$\sqrt{r_{H\infty}^2(\tau) + s_{H\infty}^2(\tau)} \leq 1; \quad (3.2)$$

$$\sqrt{r_{B\infty}^2(\tau) + s_{B\infty}^2(\tau)} \leq 1; \quad \sqrt{r_{BH\infty}^2(\tau) + s_{BH\infty}^2(\tau)} \leq 1;$$

$$-1 \leq r_{H\infty}(\tau) \leq 1; \quad -1 \leq r_{B\infty}(\tau) \leq 1; \quad -1 \leq r_{BH\infty}(\tau) \leq 1.$$

Также для трехточечной модели с неэквилидистантно расположенными излучателями (Рисунок 1.5) получены аналитические соотношения, позволяющие ответить на вопрос о том, может ли для заданного объекта быть синтезирована данная модель и определить корреляционные функции сигналов, поступающих на излучатели модели (1.30) и (1.31).

Трехточечная геометрическая модель может быть синтезирована в случае физической реализуемости всех функций в (1.30–1.31).

Рассмотрен также случай разделимости пространственной и временной переменных в функциях $F_r(\gamma, \tau)$ и $F_s(\gamma, \tau)$ моделируемого объекта, применительно к одномерному случаю. Доказано, что при этом обеспечение достоверного моделирования спектрально-корреляционных характеристик ШК распределенного объекта достигается при обеспечении требуемых параметров ПРВ и возбуждении излучателей модели сигналами с корреляционными функциями пропорциональными корреляционной функции от объекта.

Однако, практическая реализация предложенного подхода приводит к значительным сложностям. Процедура синтеза носит итерационный характер. В ходе нее определяются корреляционные функции (1.30) - (1.31) и проверяется их реализуемость. Если все функции реализуемы, синтезируется модель. Во многих реальных случаях данная процедура не приводит к реализуемой модели.

Кроме того, полученные в [29-38, 91] результаты, несмотря на их большую практическую значимость, применимы исключительно к одномерным распределенным объектам. Следовательно, возникает задача развития полученных результатов для моделей, рассмотренных в разделе 2. Кроме того, корреляционные функции (1.30) и (1.31) реализуемы в ограниченном числе случаев, например, в случае разделимости

пространственной и временной переменных в функциях $F_r(\gamma, \tau)$ и $F_s(\gamma, \tau)$ моделируемого объекта.

Вместе с тем можно предложить другой подход к формированию сигналов излучателей геометрической модели, основанный на рассмотрении частотных характеристик. Данный подход позволяет напрямую рассчитать корреляционные функции сигналов, подводимых к излучателям.

Он заключается в следующем.

Найдем преобразование Фурье от левых и правых частей уравнений (1.30) и (1.31).

$$G_{R1}(\omega) = \frac{\int G_r(\gamma, \omega)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}; \quad (3.3)$$

$$G_{R2}(\omega) = -\frac{\int G_r(\gamma, \omega)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}; \quad G_{R3}(\tau) = \frac{\int G_r(\gamma, \omega)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)};$$

$$G_{S1}(\omega) = \frac{\int G_s(\gamma, \omega)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}; \quad (3.4)$$

$$G_{S2}(\omega) = -\frac{\int G_s(\gamma, \omega)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}; \quad G_{S3}(\omega) = \frac{\int G_s(\gamma, \omega)(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)}.$$

Для каждой конкретной частоты ω^* подынтегральные функции $G_r(\gamma, \omega^*)$ и $G_s(\gamma, \omega^*)$ определяются распределением отражающих свойств по поверхности объекта на частоте ω^* . То есть, для частоты ω^* :

$$G_r(\gamma, \omega^*) = F_r^*(\gamma, \omega^*), \quad G_s(\gamma, \omega^*) = F_s^*(\gamma, \omega^*) = 0.$$

Преобразуем выражение для $G_{R1}(\omega^*)$, рассматриваемой для фиксированной частоты ω^* .

$$\begin{aligned}
 G_{R1}(\omega^*) &= \frac{\int G_r(\gamma, \omega^*)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)} = & (3.5) \\
 &= \frac{\int G_r(\gamma, \omega^*)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)} = \frac{\int F_r^*(\gamma, \omega^*)(\gamma - \gamma_2)(\gamma - \gamma_3)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)} = \\
 &= \frac{\int \gamma^2 F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma - \gamma_2 \int \gamma F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma - \gamma_3 \int \gamma F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma + \gamma_2 \gamma_3 \int F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}
 \end{aligned}$$

Преобразуем выражение (1.12) для σ_B^2 :

$$\begin{aligned}
 \sigma_B^2 &= \int_{\gamma} (\gamma - m_{\gamma})^2 F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma = \int_{\gamma} \gamma^2 F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma - & (3.6) \\
 &\quad - 2m_{\gamma} \underbrace{\int_{\gamma} \gamma F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma}_{m_{\gamma} \sigma_H^2} + m_{\gamma}^2 \underbrace{\int_{\gamma} F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma}_{\sigma_H^2}.
 \end{aligned}$$

Откуда,

$$\int_{\gamma} \gamma^2 F_r^*(\gamma, \omega^*)d\gamma = \sigma_B^2 + m_{\gamma}^2 \sigma_H^2.$$

Подставим полученное выражение в (3.5):

$$G_{R1}(\omega^*) = \frac{\sigma_B^2 + m_{\gamma}^2 \sigma_H^2 - \gamma_2 m_{\gamma} \sigma_H^2 - \gamma_3 m_{\gamma} \sigma_H^2 + \gamma_2 \gamma_3 \sigma_H^2}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)}. \quad (3.7)$$

Аналогично, для двух других функций:

$$G_{R2}(\omega^*) = -\frac{\sigma_B^2 + m_{\gamma}^2 \sigma_H^2 - \gamma_1 m_{\gamma} \sigma_H^2 - \gamma_3 m_{\gamma} \sigma_H^2 + \gamma_1 \gamma_3 \sigma_H^2}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_3)}, \quad (3.8)$$

$$G_{R3}(\omega^*) = \frac{\sigma_B^2 + m_\gamma^2 \sigma_H^2 - \gamma_1 m_\gamma \sigma_H^2 - \gamma_2 m_\gamma \sigma_H^2 + \gamma_1 \gamma_2 \sigma_H^2}{(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_3)}.$$

Полученные величины $G_{R1}(\omega^*)$, $G_{R2}(\omega^*)$, $G_{R3}(\omega^*)$ имеют смысл мощностей сигналов, которые необходимо подать на излучатели трехточечной неэквидистантной модели для того, чтобы обеспечить на частоте ω^* заданное значение параметров ПРВ ШК μ_γ и m_γ . Выражения (3.7) – (3.8) полностью совпадают с выражениями для мощностей сигналов P_1 , P_2 , P_3 (1.29) необходимых для обеспечения заданных параметров распределения ШК. Это подтверждает справедливость рассматриваемого подхода.

Как было показано ранее, а также в работах [29-38], трехточечная модель с неэквидистантно расположенными излучателями позволяет независимо управлять параметрами распределения ШК μ_γ и m_γ в некотором диапазоне их значений. Соотношения для определения границ этого диапазона также получены в [31]. Используя изложенный выше подход, связанный с переходом в частотную область, можно утверждать, что такая модель позволит получить заданные значения параметров ПРВ ШК для определенного диапазона частот. При этом для каждой частоты диапазона будет реализована, по сути, отдельная модель. Модель для диапазона частот является, таким образом, суперпозицией моделей для отдельных частот.

Такой подход к формированию сигналов излучателей геометрической модели имеет прозрачный физический смысл. Переход в спектральную область подразумевает декомпозицию объекта на фрагменты, выделенные по линиям равной частоты ω . При этом каждый такой фрагмент замещается, по сути, отдельной моделью с заданными $\mu_\gamma(\omega)$ и $m_\gamma(\omega)$.

Предложенный подход справедлив и для двухточечной модели, так как последняя является частным случаем трехточечной модели при совпадении координат двух излучающих точек. Однако, как было указано ранее и в работах [91, 31, 36-38], недостатком двухточечной модели является жесткая взаимная связь между параметрами ПРВ ШК. Согласно рассмотренному подходу это означает выполнение условий адекватности моделирования только на одной частоте.

Таким образом, можно говорить, что переход от рассмотрения корреляционных функций сигналов излучателей геометрической модели $R_i(\tau)$, $S_i(\tau)$ к рассмотрению соответствующих частотных характеристик $G_{Ri}(\omega)$ позволяет:

1. Получить конструктивный способ синтеза геометрических моделей распределенных объектов. Недостатком подхода, основанного на использовании корреляционных функций является ограниченная простейшими случаями реализуемость функций (3.3) и (3.4). На основе рассмотренного подхода можно определить мощности сигналов излучателей модели для получения заданных значений параметров распределения ШК. Таким образом, формируя требуемые параметры распределения для некоторого диапазона частот, можно гарантировать достоверное моделирование как плотности распределения ШК, так и их спектрально-корреляционных характеристик.

2. Синтезировать физически реализуемые модели. В отличие от подхода, основанного на использовании корреляционных функций сигналов излучателей, который позволяет получить физически реализуемые модели только в ограниченном числе случаев, данный подход всегда приводит к синтезу физически реализуемых моделей, поскольку исходит из этого предположения.

3. Синтезировать модели многомерных распределенных объектов. Подход, основанный на формировании сигналов излучателей во временной области наталкивается на серьезные ограничения даже для одномерных объектов. Переход в спектральную область позволяет одинаково удобно синтезировать модели как для одномерных, так и для двумерных и трехмерных объектов.

Разовьем предложенный подход, связанный с переходом в спектральную область, для двумерных моделей.

Поскольку переход в спектральную область основан на декомпозиции объекта на отдельные фрагменты, то в первую очередь требуется доказать, что достоверное моделирование характеристик ШК отдельных фрагментов объекта позволяет достоверно моделировать характеристики ШК всего объекта в целом.

3.2. Декомпозиция сложного распределенного объекта

Предложенный в подразделе 3.1 спектральный подход к синтезу моделей сложного распределенного объекта подразумевает декомпозицию этого объекта на совокупность фрагментов, выделенных по линиям равной частоты. При этом для моделирования ШК каждого фрагмента требуется обеспечить определенные мощности сигналов излучателей на соответствующей частоте. По сути, для каждого отдельного фрагмента будет сформирована отдельная модель. Однако, применение такого принципа требует доказательства того факта, что все модели элементарных фрагментов в совокупности позволяют имитировать отражение от распределенного объекта в целом. Иными словами, необходимо подтвердить, что при адекватном моделировании статистических характеристик ШК отдельных фрагментов, достигается адекватное моделирование тех же характеристик для всего объекта в целом.

Разобьем двумерный распределённый объект на совокупность N фрагментов с площадью поверхности S_i , $i = 1, 2 \dots N$ (Рисунок 3.1). Алгоритм декомпозиции и форма и размеры поверхности фрагментов в общем случае произвольные. Верно лишь, что для каждого фрагмента выполняются условия реализуемости геометрических моделей.

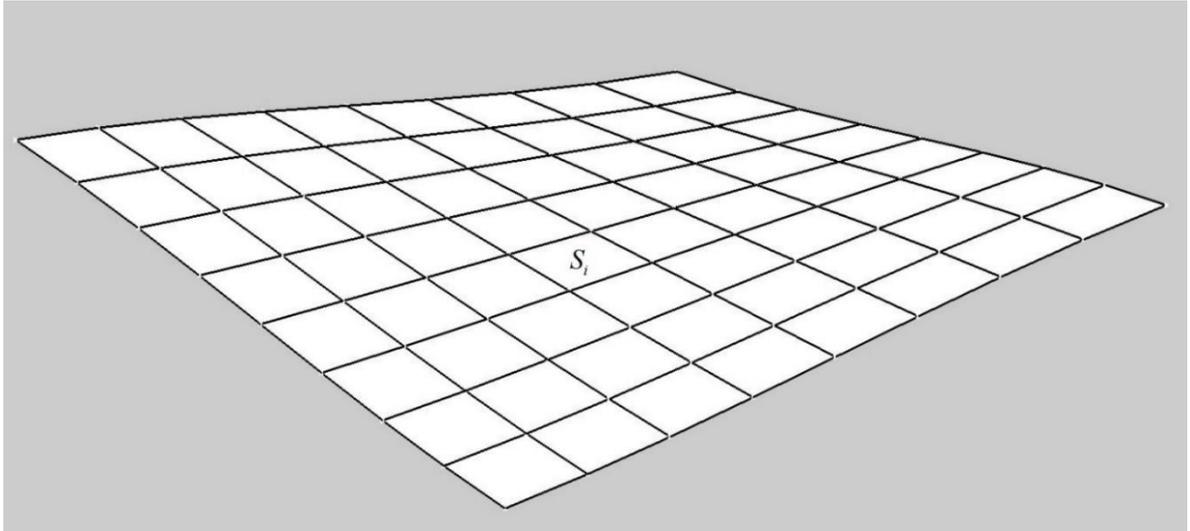


Рисунок 3.1. Пример декомпозиции поверхности.

При разбиении объекта на части коэффициенты корреляции ШК можно представить в виде:

$$r_H(\tau) = \frac{1}{\sigma_H^2} \iiint_{y x z} F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \frac{1}{\sigma_H^2} \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} F_r(y, x, \tau) dy dx, \quad (3.9)$$

$$s_H(\tau) = \frac{1}{\sigma_H^2} \iiint_{y x z} F_s(y, x, z, \tau) dy dx dz = \frac{1}{\sigma_H^2} \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} F_s(y, x, \tau) dy dx,$$

$$r_{BH}(\tau) = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \iiint_{y x z} (y - m) F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} (y - m) F_r(y, x, \tau) dy dx,$$

$$s_{BH}(\tau) = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \iiint_{y x z} (y - m) F_s(y, x, z, \tau) dy dx dz = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} (y - m) F_s(y, x, \tau) dy dx,$$

$$r_B(\tau) = \frac{1}{\sigma_B^2} \iiint_{y x z} (y - m)^2 F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \frac{1}{\sigma_B^2} \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} (y - m)^2 F_r(y, x, \tau) dy dx,$$

$$s_B(\tau) = \frac{1}{\sigma_B^2} \iiint_{y x z} (y - m)^2 F_s(y, x, z, \tau) dy dx dz = \frac{1}{\sigma_B^2} \sum_{i=1}^N \iint_{S_i} (y - m)^2 F_s(y, x, \tau) dy dx.$$

При адекватном моделировании ШК элемента поверхности с помощью геометрической модели выполняется равенство следующих характеристик:

$$\sigma_B \{S_i\} = \sigma_B \{m_i\}, \quad \sigma_S \{S_i\} = \sigma_S \{m_i\}, \quad (3.10)$$

$$\iint_{S_i} (y - m)^n F_r(y, x, \tau) dy dx = \iint_{S_{mi}} (y - m)^n F_r(y, x, \tau) dy dx,$$

$$\iint_{S_i} (y - m)^n F_s(y, x, \tau) dy dx = \iint_{S_{mi}} (y - m)^n F_s(y, x, \tau) dy dx,$$

где индексом m отмечен параметр геометрической модели, а индексом i – параметр, соответствующий i -му фрагменту поверхности или его модели.

При выполнении условий (3.10) можно записать следующее:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi}^2} \iint_{S_i} F_r(y, x, \tau) dy dx = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi}^2} \iint_{S_{mi}} F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx, \quad (3.11)$$

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

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi}} \iint_{S_i} (y - m_i) F_r(y, x, \tau) dy dx = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi}} \iint_{S_{mi}} (y - m_{mi}) F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx,$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi} S_i} \iint (y - m_i) F_s(y, x, \tau) dy dx = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi} S_{mi}} \iint (y - m_{mi}) F_{smi}(y, x, \tau) dy dx,$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \iint (y - m_i)^2 F_r(y, x, \tau) dy dx = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \iint (y - m_{mi})^2 F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx,$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \iint (y - m_i)^2 F_s(y, x, \tau) dy dx = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \iint (y - m_{mi})^2 F_{smi}(y, x, \tau) dy dx.$$

Сравнивая выражения (3.9) и (3.11), получаем:

$$\frac{1}{\sigma_H^2} \iiint F_r(y, x, z, \tau) dy dx dz = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi}^2} \iint F_{rmi}(y, x, \tau) dy dx, \quad (3.12)$$

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

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

$$\frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \iiint (y - m) F_s(y, x, z, \tau) dy dx dz = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{Hi} \sigma_{Bi} S_{mi}} \iint (y - m_{mi}) F_{smi}(y, x, \tau) dy dx,$$

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

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

Выражения (3.12) показывают, что адекватное моделирование статистических характеристик ШК отдельных фрагментов поверхности гарантирует адекватное моделирование тех же характеристик для всего объекта в целом.

3.3. Случай разделимости пространственной и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ объекта

В подразделе 3.1 показано, что для достоверного моделирования спектральных характеристик ШК необходимо подводить к излучателям геометрической модели сигналы, СПМ которых определяется функциями $\mu_{\gamma\infty}(\omega)$ и $m_{\gamma\infty}(\omega)$ объекта. В определенных условиях формирование сигналов излучателей может быть упрощено.

Рассмотрим геометрическую модель объекта, содержащую N излучающих точек, некоторым образом расположенных в пространстве (Рисунок 3.2).

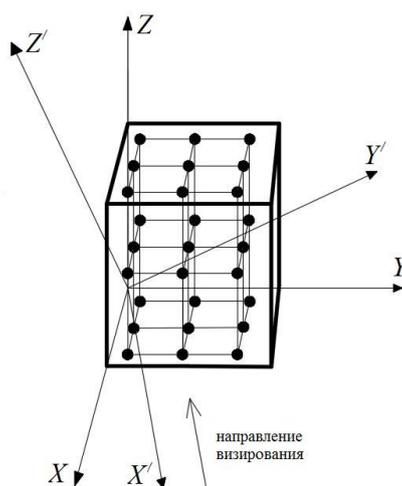


Рисунок 3.2. N – точечная модель трехмерного отражающего объекта.

Как уже было сказано, достоверная имитация ШК реального распределенного объекта достигается при равенстве параметров распределения (1.7) и корреляционной функции (1.15) для модели (Рисунок 3.2) и объекта. По сути, необходимо обеспечить равенство параметров m_γ , μ_γ , $r_H(\tau)$, $s_H(\tau)$, $r_B(\tau)$, $s_B(\tau)$, $r_{BH}(\tau)$, $s_{BH}(\tau)$ для модели и объекта. Тогда условия достоверной имитации ШК можно записать в виде:

$$m_{\gamma\Sigma} = m_{\gamma\infty}; \mu_{\gamma\Sigma} = \mu_{\gamma\infty}; \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^N R_i(\tau) = \sigma_{H^\infty}^2 r_{H^\infty}(\tau); \quad \sum_{i=1}^N S_i(\tau) = \sigma_{H^\infty}^2 s_{H^\infty}(\tau);$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_\gamma) R_i(\tau) = \sigma_{B^\infty} \sigma_{H^\infty} r_{BH^\infty}(\tau); \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_\gamma) S_i(\tau) = \sigma_{B^\infty} \sigma_{H^\infty} s_{BH^\infty}(\tau);$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_\gamma)^2 R_i(\tau) = \sigma_{B^\infty}^2 r_{B^\infty}(\tau); \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_\gamma)^2 S_i(\tau) = \sigma_{B^\infty}^2 s_{B^\infty}(\tau),$$

где $R_i(\tau)$ и $S_i(\tau)$ - соответственно автокорреляционные и взаимокорреляционные функции сигналов, поступающих на i -ый излучатель геометрической модели; индексы « Σ » и « ∞ » здесь и далее означают принадлежность параметра к модели или объекту соответственно.

Пусть визирование объекта ведется вдоль оси X' системы координат $X'Y'Z'$ (см. Рисунок 3.2). В этой системе координат имеем $F_{r^\infty}(x', y', z', \tau)$ и $F_{s^\infty}(x', y', z', \tau)$, пересчитанные из $F_{r^\infty}(x, y, z, \tau)$ и $F_{s^\infty}(x, y, z, \tau)$. Предположим, что эти функции допускают разделение пространственных и временной переменных:

$$F_{r^\infty}(x', y', z', \tau) = F_{r^\infty}(x', y', z') r_\infty(\tau), \quad (3.14)$$

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

где $r_\infty(\tau)$ - коэффициент корреляции одноименных квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала, отраженного от объекта, $s_\infty(\tau)$ - коэффициент корреляции разноименных квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала, отраженного от объекта.

Предположим, что для модели Рисунка 3.2 выполняется следующее:

$$m_{\gamma\Sigma} = m_{\gamma^\infty}, \quad \mu_{\gamma\Sigma} = \mu_{\gamma^\infty}.$$

При разделимости переменных в функциях $F_{r^\infty}(x', y', z', \tau)$ и $F_{s^\infty}(x', y', z', \tau)$ выражения для коэффициентов (3.9) приобретают вид:

$$r_{H\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau) \underbrace{\frac{1}{\sigma_{H\infty}^2} \int \int \int_{x' y' z'} F_{r\infty}(x', y', z') dx' dy' dz'}_{\sigma_{H\infty}^2}; \quad (3.15)$$

$$s_{H\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau) \underbrace{\frac{1}{\sigma_{H\infty}^2} \int \int \int_{x' y' z'} F_{r\infty}(x', y', z') dx' dy' dz'}_{\sigma_{H\infty}^2}; \quad (3.16)$$

$$r_{B\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau) \underbrace{\frac{1}{\sigma_{B\infty}^2} \int \int \int_{x' y' z'} (x' - m_{x'})^2 F_{r\infty}(x', y', z') dx' dy' dz'}_{\sigma_{B\infty}^2}; \quad (3.17)$$

$$s_{B\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau) \underbrace{\frac{1}{\sigma_{B\infty}^2} \int \int \int_{x' y' z'} (x' - m_{x'})^2 F_{r\infty}(x', y', z') dx' dy' dz'}_{\sigma_{B\infty}^2}; \quad (3.18)$$

$$r_{BH\infty}(\tau) = \frac{r_{\infty}(\tau)}{\sigma_{B\infty} \sigma_{H\infty}} \underbrace{\int \int \int_{x' y' z'} (x' - m_{x'}) F_{r\infty}(x', y', z') dx' dy' dz'}_{=0} = 0; \quad (3.19)$$

$$s_{BH\infty}(\tau) = \frac{s_{\infty}(\tau)}{\sigma_{B\infty} \sigma_{H\infty}} \underbrace{\int \int \int_{x' y' z'} (x' - m_{x'}) F_{s\infty}(x', y', z') dx' dy' dz'}_{=0} = 0. \quad (3.20)$$

Равенство нулю отмеченных множителей в выражениях (3.19-3.20) вытекает из определения параметра m_{γ} (1.9).

Сокращая в выражениях (3.17-3.22) одноименные параметры, получим:

$$r_{H\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau); \quad s_{H\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau); \quad (3.23)$$

$$r_{B\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau); \quad s_{B\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau); \quad r_{BH\infty}(\tau) = s_{BH\infty}(\tau) = 0.$$

Перепишем условия адекватного моделирования ШК (3.15), касающиеся спектрально-корреляционных характеристик, с учетом (3.23):

$$\sum_{i=1}^N R_i(\tau) = \sigma_{H\infty}^2 r_{\infty}(\tau), \quad \sum_{i=1}^N S_i(\tau) = \sigma_{H\infty}^2 s_{\infty}(\tau), \quad (3.24)$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) R_i(\tau) = 0, \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) S_i(\tau) = 0,$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 R_i(\tau) = \sigma_{B\infty}^2 r_{\infty}(\tau), \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 S_i(\tau) = \sigma_{B\infty}^2 s_{\infty}(\tau).$$

Пусть к излучателям модели Рисунка 3.2. подводятся сигналы с корреляционными функциями вида:

$$R_i(\tau) = \sigma_i^2 r_\infty(\tau), \quad S_i(\tau) = \sigma_i^2 s_\infty(\tau). \quad (3.25)$$

При этом мощности сигналов, подводимых к излучателям, выбраны таким образом, что:

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \sigma_{H\infty}^2.$$

В этом случае условия адекватного моделирования ШК (3.24) можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 r_\infty(\tau) = \sigma_{H\infty}^2 r_\infty(\tau), \quad \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 s_\infty(\tau) = \sigma_{H\infty}^2 s_\infty(\tau), \quad (3.26)$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) \sigma_i^2 r_\infty(\tau) = 0, \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) \sigma_i^2 s_\infty(\tau) = 0,$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 \sigma_i^2 r_\infty(\tau) = \sigma_{B\infty}^2 r_\infty(\tau), \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 \sigma_i^2 s_\infty(\tau) = \sigma_{B\infty}^2 s_\infty(\tau).$$

Сокращая в полученных выражениях (3.26) $r_\infty(\tau)$ и $s_\infty(\tau)$ и учитывая, что $r_\infty(\tau) \neq 0$, $s_\infty(\tau) \neq 0$, получаем:

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \sigma_{H\infty}^2, \quad (3.27)$$

$$\sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) \sigma_i^2 = 0, \quad \sum_{i=1}^N (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 \sigma_i^2 = \sigma_{B\infty}^2.$$

Полученные уравнения (3.27) содержат только мощности сигналов и координаты излучателей. По сути, они определяют условия, при выполнении которых обеспечивается равенство параметров распределения ШК m_γ и μ_γ для модели и объекта, т.е. достоверное моделирование ПРВ ШК. При этом моделирование корреляционных характеристик ШК обеспечивается за счет того, что к излучающим точкам модели подводятся сигналы с автокорреляционной и взаимно корреляционной функциями вида (3.25).

3.4. Синтез моделей для типовых ситуаций при имитации

Цель данного подраздела: развить полученные ранее теоретические результаты применительно к следующим типовым ситуациям, возникающим при моделировании отражений от распределенных объектов:

а) размер фрагмента объекта не превышает размеров элемента разрешения и функции $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ объекта не допускают делимость пространственных и временной переменных;

б) размер фрагмента объекта не превышает размеров элемента разрешения и функции $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ объекта допускают делимость пространственных и временной переменных;

в) размер фрагмента объекта превышает размеры элемента разрешения.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Определить возможность использования рассмотренных в разделе 2 моделей в каждой из этих ситуаций.

2. Получить аналитические соотношения, позволяющие синтезировать в каждом указанном случае геометрическую модель с заданными вероятностными и спектрально-корреляционными характеристиками.

Вначале кратко отметим основные особенности моделирования в каждой из указанных типовых ситуаций. Затем подробно рассмотрим возможность использования рассмотренных в разделе 2 моделей в каждой из этих ситуаций.

А. Как было показано в пункте 3.3, при делимости пространственных и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ распределенного объекта достоверная имитация характеристик ШК сводится к обеспечению равенства параметров ПРВ ШК для модели и

объекта. При этом на излучатели геометрической модели необходимо подавать сигналы с корреляционными функциями пропорциональными корреляционным функциям эхосигнала от замещаемого объекта. Для формирования сигналов, подаваемых на излучатели геометрической модели, необходимо все спектральные составляющие эхосигнала взвесить на один и тот же коэффициент.

В этом случае, можно применить все рассмотренные ранее модели с учетом тех ограничений, которыми они обладают.

Б. Для этой ситуации следует отдельно исследовать две группы рассмотренных моделей: модели, допускающие независимое управление параметрами μ_γ и m_γ (к таковым, например, относятся рассмотренные в пунктах 2.1.3-2.1.5) и модели, не допускающие этого.

Рассмотренные в разделе 2 двухточечная и четырехточечная модели не позволяют независимо друг от друга устанавливать значения параметров ПРВ μ_γ и m_γ . С точки зрения спектрального подхода, описанного в данном разделе, такие модели позволяют выполнить моделирование характеристик ШК только для одной частоты. При изменении частоты для обеспечения заданных параметров ШК необходимо изменить расположение излучателей.

Рассмотренные в разделе 2 трехточечная и девятиточечная модели (а также модели на их основе с большим количеством излучателей) позволяют осуществлять независимое управление параметрами распределения ШК μ_γ и m_γ . С точки зрения рассмотренного спектрального подхода, такие модели позволяют достоверно моделировать параметры ШК в некотором диапазоне частот. При этом не требуется изменять положение излучателей, в отличие, от моделей, упомянутых выше. Сигналы, подводимые к излучателям моделей данного типа, представляют собою сумму сигналов, обеспечивающих заданные параметры ШК на отдельных частотах.

В. При превышении фрагмента объекта размеров элемента разрешения необходимо разделить этот фрагмент на участки и синтезировать модель для каждого участка в отдельности. Справедливость такого подхода доказана в подразделе 3.3.

Далее рассмотрим синтез моделей в каждой из указанных ситуаций.

3.4.1. Модели объектов, $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ которых допускают делимость пространственных и временной переменных

Каждый фрагмент распределенного объекта, для которого выполняется условие делимости переменных, потенциально может быть замещен любой из рассмотренных моделей. Однако, каждая модель обладает рядом ограничений, которые уже были подробно рассмотрены в разделе 2. Здесь лишь кратко их вновь упомянем.

Двухточечная модель (Рисунок 2.1) может быть синтезирована с использованием выражений (2.7-2.8). Поскольку данная модель не позволяет независимо управлять параметрами распределения ШК, то имеется возможность задания либо углового положения объекта, либо его угловых размеров. Кроме того, модель не позволяет независимо управлять параметрами ПРВ ШК вдоль двух ортогональных осей. Следовательно, данная модель имеет ограниченное применение.

Определим СПМ сигналов, подаваемых на излучатели геометрической модели.

Как показано в подразделе 3.3, для достоверного моделирования корреляционных характеристик ШК объекта, функции $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ которого допускают делимость пространственных и временной переменных, необходимо к излучателям геометрической модели подводить сигналы с корреляционными функциями вида (3.25). СПМ сигналов определим с помощью преобразования Фурье:

$$G_1(\omega) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega), \quad G_2(\omega) = G_\infty(\omega) \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} \right), \quad (3.28)$$

где $G_\infty(\omega)$ – СПМ комплексной огибающей сигнала, отраженного от распределенного объекта. Принято, что $\sigma_{H\infty}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$.

Аналогично можно получить выражения для СПМ сигналов, подаваемых на излучатели всех остальных рассмотренных геометрических моделей в случае разделимости пространственных и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ объекта. Для удобства практического использования сведем эти результаты в Таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Синтез геометрических моделей в случае разделимости пространственных и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ объекта.

№	Название модели	Ссылки на выражения для синтеза	Выражения для СПМ сигналов
1	Двухточечная (Рисунок 2.1)	(2.7) – (2.8)	$G_1(\omega) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_2(\omega) = G_\infty(\omega) \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} \right)$
2	Трехточечная (Рисунок 2.7)	(2.20)	$G_1(\omega) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_2(\omega) = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_3(\omega) = \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} - \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{H\infty}^2} \right) G_\infty(\omega).$

3	<p>Четырехточечная (Рисунок 2.5)</p>	<p>(2.13) – (2.14)</p>	$G_1(\omega) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_2(\omega) = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_3(\omega) = \frac{\sigma_3^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_4(\omega) = \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} - \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{H\infty}^2} - \frac{\sigma_3^2}{\sigma_{H\infty}^2} \right) G_\infty(\omega)$ <p>Для инвариантной модели:</p> $G_i(\omega) = \frac{1}{4} G_\infty(\omega), \quad i = 1, 2, 3, 4.$
4	<p>Пятиточечная (Рисунок 2.10)</p>	<p>(2.30)</p>	$G_0(\omega) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_1(\omega) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_2(\omega) = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_3(\omega) = \frac{\sigma_3^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $G_4(\omega) = \left(1 - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{H\infty}^2} - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{H\infty}^2} - \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{H\infty}^2} - \frac{\sigma_3^2}{\sigma_{H\infty}^2} \right) G_\infty(\omega),$ <p>Для инвариантной модели:</p>

			$G_i(\omega) = \frac{\sigma_{H\infty}^2 - \sigma_0^2}{4\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega), \quad i = 1, 2, 3, 4,$ $G_0(\omega) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega)$
5	Девятиточечная (Рисунок 2.7)	(2.45) – (2.46)	$G_i(\omega) = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega),$ $i = 0, 1 \dots 7.$ $G_8(\omega) = \left(1 - \sum_{i=0}^7 \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{H\infty}^2} \right) G_\infty(\omega)$ <p>Для инвариантной модели:</p> $G_i(\omega) = \frac{\sigma_{H\infty}^2 - \sigma_0^2}{8\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega), \quad i = 1, 2, 3, 4,$ $G_0(\omega) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{H\infty}^2} G_\infty(\omega).$

При синтезе рассмотренных в подразделе 2.2 моделей с инвариантными свойствами приведённые в Таблице 3.1 выражения упрощаются. Поскольку при этом требуется равенство мощностей сигналов излучателей, в выражениях для СПМ сигналов получим равные коэффициенты.

3.4.2. Модели объектов, $F_R(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ которых не допускают разделимость пространственных и временной переменных

Рассмотрим случай синтеза моделей, не допускающих независимое управление параметрами ПРВ ШК. На основании предложенного в этом

разделе подхода, связанного с переходом в частотную область, мощности сигналов излучателей на каждой фиксированной частоте могут быть определены по выражениям, полученным в разделе 2. Взаимозависимость значений параметров μ_γ и m_γ позволяет обеспечивать достоверное моделирование вероятностных и спектрально-корреляционных характеристик ШК только на одной частоте. Для получения заданных характеристик ШК на других частотах необходимо изменить расположение излучателей модели.

Как доказано в подразделе 3.1, СПМ сигналов излучателей можно определить по выражениям для синтеза моделей, подставив в эти выражения частотную зависимость параметров распределения ШК $\mu_{\gamma\infty}(\omega)$ и $m_{\gamma\infty}(\omega)$ объекта. При этом обеспечивается достоверное моделирование как вероятностных, так и спектрально-корреляционных характеристик ШК распределенного объекта.

Полученные выражения для определения СПМ сигналов сведем в Таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Синтез геометрических моделей, не допускающих независимое управление параметрами ПРВ ШК.

№	Название модели	Ссылки на выражения для синтеза	Выражения для СПМ сигналов
1	Двухточечная (Рисунок 2.1)	(2.7) – (2.8)	$\frac{G_\Delta(\omega)}{G_\Sigma(\omega)} = \frac{m_{\gamma\infty}(\omega)}{A(\theta)},$ $\mu_\gamma(m_\gamma, \theta) = \frac{1}{\sqrt{A^2(\theta) - m_\gamma^2}}$

			<p>ИЛИ</p> $\frac{G_{\Delta}(\omega)}{G_{\Sigma}(\omega)} = \sqrt{1 - \frac{1}{\mu_{\gamma\infty}(\omega)A^2(\theta)}},$ $m_{\gamma}(\mu_{\gamma}, \theta) = \sqrt{A^2(\theta) - \frac{1}{\mu_{\gamma}^2}}$ <p>Обозначения:</p> $A(\theta) = \frac{L}{2} \cos(\psi - \theta),$ $G_{\Delta}(\omega) = G_1(\omega) - G_2(\omega),$ $G_{\Sigma}(\omega) = G_1(\omega) + G_2(\omega).$
2	<p>Четырехточечная (Рисунок 2.5)</p>	<p>(2.13) – (2.14)</p>	$G_1(\omega) - G_2(\omega) =$ $= \frac{G_{\Sigma}(\omega)}{2} \left(\frac{m_Y(\omega)}{l_c} - \frac{m_X(\omega)}{l_s} \right),$ $G_4(\omega) - G_3(\omega) =$ $= \frac{G_{\Sigma}(\omega)}{2} \left(\frac{m_Y(\omega)}{l_c} + \frac{m_X(\omega)}{l_s} \right),$ $\mu_Y(m_Y) = \frac{1}{\sqrt{l_c^2 - m_Y^2}},$ $\mu_X(m_X) = \frac{1}{\sqrt{l_s^2 - m_X^2}}.$ <p>ИЛИ</p>

		$G_4(\omega) + G_3(\omega) =$ $\frac{G_\Sigma(\omega)}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{l_c^2 \mu_Y^2(\omega)}} + \sqrt{1 - \frac{1}{l_s^2 \mu_X^2(\omega)}} \right)$ $G_2(\omega) - G_1(\omega) =$ $\frac{G_\Sigma(\omega)}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{l_s^2 \mu_X^2(\omega)}} - \sqrt{1 - \frac{1}{l_c^2 \mu_Y^2(\omega)}} \right)$ $m_Y(\mu_Y) = \sqrt{l_c^2 - \mu_Y^2}, \quad m_X(\mu_X) = \sqrt{l_c^2 - \mu_X^2}.$ <p>Для инвариантной модели:</p> $G_i(\omega) = \frac{1}{4} G_\infty(\omega), \quad i = 1, 2, 3, 4.$
--	--	---

Рассмотрим случай синтеза моделей, допускающих независимое управление параметрами распределения ШК. С точки зрения спектрального подхода такие модели позволяют выполнить имитацию ШК распределённого объекта в некотором диапазоне частот. При этом не требуется изменять расположение излучателей модели.

СПМ сигналов излучателей, как показано ранее, определяются по выражениям для синтеза моделей, полученных в разделе 2, путем подстановки в них частотных зависимостей параметров распределения ШК объекта.

Полученные результаты сведены в Таблицу 3.3.

Таблица 3.3. Синтез геометрических моделей, допускающих независимое управление параметрами ПРВ ШК.

№	Название модели	Ссылки на выражен	Выражения для СПМ сигналов

		ия для синтеза	
2	Трехточечная (Рисунок 2.7)	(2.20)	$G_1(\omega) = \frac{G_{\Sigma}(\omega) \left(l_{c2} m_X(\omega) - m_X^2(\omega) - \frac{1}{\mu_X^2(\omega)} \right)}{l_{c1}(l_{c1} - l_{c2})}$ $G_2(\omega) = \frac{G_{\Sigma}(\omega) \left(m_X^2(\omega) + l_{c1} m_X(\omega) + \frac{1}{\mu_X^2(\omega)} \right)}{l_{c2}(l_{c2} - l_{c1})}$ $G_3(\omega) = \frac{G_{\Sigma}(\omega) \left[(l_{c1} + l_{c2}) \left(m_X^2(\omega) - l_{c1} l_{c2} + \frac{1}{\mu_X^2(\omega)} \right) + m_X(\omega) (l_{c1}^2 - l_{c2}^2) \right]}{l_{c1} l_{c2} (l_{c1} - l_{c2})} \Gamma_p$ <p>аницы диапазона, в котором можно независимо управлять параметрами распределения:</p> <p>При визировании вдоль оси OX :</p> $\mu_{X \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_X - L_2 \cos \psi_2)(m_X + L_1 \cos \psi_1)}}$ $\mu_{X \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X + L_1 \cos \psi_1)}}$ $\mu_{X \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X - L_2 \cos \psi_2)}}$ <p>При визировании вдоль оси OY :</p> $\mu_{Y \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_Y - L_1 \sin \psi_1)(m_Y + L_2 \sin \psi_2)}}$

			$\mu_{Y \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y + L_2 \sin \psi_2)}}$ $\mu_{Y \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y - L_1 \sin \psi_1)}}$
2	Четырехточечная (Рисунок 2.5)	(2.13) – (2.14)	$G_1(\omega) - G_2(\omega) =$ $= \frac{G_\Sigma(\omega)}{2} \left(\frac{m_Y(\omega)}{l_c} - \frac{m_X(\omega)}{l_s} \right),$ $G_4(\omega) - G_3(\omega) =$ $= \frac{G_\Sigma(\omega)}{2} \left(\frac{m_Y(\omega)}{l_c} + \frac{m_X(\omega)}{l_s} \right),$ $\mu_Y(m_Y) = \frac{1}{\sqrt{l_c^2 - m_Y^2}}, \quad \mu_X(m_X) = \frac{1}{\sqrt{l_s^2 - m_X^2}}.$ <p>ИЛИ</p> $G_4(\omega) + G_3(\omega) =$ $\frac{G_\Sigma(\omega)}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{l_c^2 \mu_Y^2(\omega)}} + \sqrt{1 - \frac{1}{l_s^2 \mu_X^2(\omega)}} \right)$ $G_2(\omega) - G_1(\omega) =$ $\frac{G_\Sigma(\omega)}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{l_s^2 \mu_X^2(\omega)}} - \sqrt{1 - \frac{1}{l_c^2 \mu_Y^2(\omega)}} \right)$ $m_Y(\mu_Y) = \sqrt{l_c^2 - \mu_Y^2}, \quad m_X(\mu_X) = \sqrt{l_s^2 - \mu_X^2}.$ <p>Для инвариантной модели:</p> $G_i(\omega) = \frac{1}{4} G_\infty(\omega), \quad i = 1, 2, 3, 4.$

3	<p>Девятиточечная (Рисунок 2.7)</p>	<p>(2.45) – (2.46)</p>	<p>При заданных $m_{X\infty}(\omega)$, $\mu_{X\infty}(\omega)$ и $m_{Y\infty}(\omega)$, $\mu_{Y\infty}(\omega)$ СПМ сигналов излучателей должны удовлетворять:</p> $\frac{G_{236}(\omega)}{G_{\Sigma}(\omega)} = \frac{\frac{1}{\mu_X^2(\omega)} + m_X(\omega)(m_X(\omega) - l_{c1})}{l_{c2}(l_{c1} + l_{c2})};$ $\frac{G_{147}(\omega)}{G_{\Sigma}(\omega)} = \frac{m_X(\omega)}{l_{c1}} + \frac{\frac{1}{\mu_X^2(\omega)} + m_X(\omega)(m_X(\omega) - l_{c1})}{l_{c1}(l_{c1} + l_{c2})};$ $\frac{G_{125}(\omega)}{G_{\Sigma}(\omega)} = \frac{\frac{1}{\mu_Y^2(\omega)} + m_Y(\omega)(m_Y(\omega) - l_{s3})}{l_{s1}(l_{s1} + l_{s3})};$ $\frac{G_{348}(\omega)}{G_{\Sigma}(\omega)} = \frac{m_Y(\omega)}{l_{s3}} + \frac{\frac{1}{\mu_Y^2(\omega)} + m_Y(\omega)(m_Y(\omega) - l_{s3})}{l_{s3}(l_{s1} + l_{s3})}.$ <p>Границы диапазона, в котором можно независимо управлять параметрами распределения:</p> <p>При визировании вдоль оси OX :</p> $\mu_{X \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_X - L_1 \cos \psi_1)(m_X + L_2 \cos \psi_2)}}$ $\mu_{X \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X + L_2 \cos \psi_2)}}$ $\mu_{X \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_X(m_X - L_1 \cos \psi_1)}}$ <p>При визировании вдоль оси OY :</p>
---	---	----------------------------	--

			$\mu_{Y \min} = \frac{1}{\sqrt{-(m_Y - L_3 \sin \psi_3)(m_Y + L_1 \sin \psi_1)}}$ $\mu_{Y \max 1} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y + L_1 \sin \psi_1)}}$ $\mu_{Y \max 2} = \frac{1}{\sqrt{-m_Y(m_Y - L_3 \sin \psi_3)}}$
--	--	--	---

В Таблице 3.3 для каждой модели приведены также выражения для границ диапазона независимого управления параметрами распределения ШК.

3.5. Выводы по третьему разделу

1. Предложен спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов. Этот подход позволяет по спектральным характеристикам эхосигналов от точек распределенного объекта рассчитать сигналы излучателей геометрической модели для обеспечения достоверной имитации.

2. Доказано правомерность применения принципа декомпозиции при имитации ШК сложного распределенного объекта. Таким образом, достоверное моделирование по выбранному критерию ШК отдельных фрагментов распределенного объекта гарантирует достоверное моделирование ШК всего объекта в целом.

3. Установлено, что при разделимости пространственных и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ объекта, достоверная имитация ШК сводится к обеспечению равенства параметров ПРВ ШК для модели и объекта. При этом к излучателям геометрической модели следует подводить сигналы с корреляционными функциями пропорциональными корреляционным функциям эхосигнала от замещаемого объекта.

4. Получены аналитические выражения, позволяющие определить СПМ сигналов, подводимых к излучателям геометрических моделей, рассмотренных в разделе 2, как в случае наличия разделимости переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$ объекта, так и при ее отсутствии.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

Цель раздела: развить полученные теоретические результаты до уровня их практического использования, а также провести их апробацию.

В данном разделе решены следующие **задачи**.

1. На примере имитации эхосигнала от поверхности Земли предложен алгоритм синтеза моделей, определяющих ее отражающие свойства.

2. Предложен алгоритм имитации эхосигналов от поверхности Земли, основанный на использовании полученных теоретических результатов, а именно моделей поверхности и способов формирования сигналов излучателей, обеспечивающих достоверное моделирование.

3. На основе полученных в пункте 1 и пункте 2 результатов предложен обобщенный алгоритм синтеза моделей распределенных радиолокационных объектов.

4.1. Описание свойств отражений от земной поверхности

Перед описанием алгоритма имитации сигналов, отраженных от поверхности Земли, уместно детально рассмотреть их свойства.

Многие аспекты, характерные для процесса отражения сигналов от поверхности Земли, уже были отмечены в первом разделе при описании свойств сигналов, отраженных от поверхностно-распределенных объектов. В частности, рассмотрен механизм формирования отраженного сигнала при представлении поверхности совокупностью большого числа отражателей. Приведены выражения для отраженного сигнала (1.1), СПМ эхосигнала (1.2) и мгновенной СПМ доплеровских флуктуаций эхосигнала (1.3) от излучателей, находящихся на линии постоянной дальности. В этом

подразделе будут рассмотрены некоторые конкретные параметры, оказывающие влияние на вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики эхосигнала и ШК.

Далее под минимальным размером элемента разрешения будем понимать величину (подразумевается однопозиционная радиолокация и монохроматический импульсный зондирующий сигнал):

$$\Delta D_{\min} = \frac{\tau_p c}{2}, \quad (4.1)$$

где τ_p – разрешающая способность РЛС по времени. Ширину элемента разрешения по угловой координате принимаем равной ширине ДНА на уровне 0.5 в азимутальной плоскости $\Delta_{0.5}$ (Рисунок 4.1).

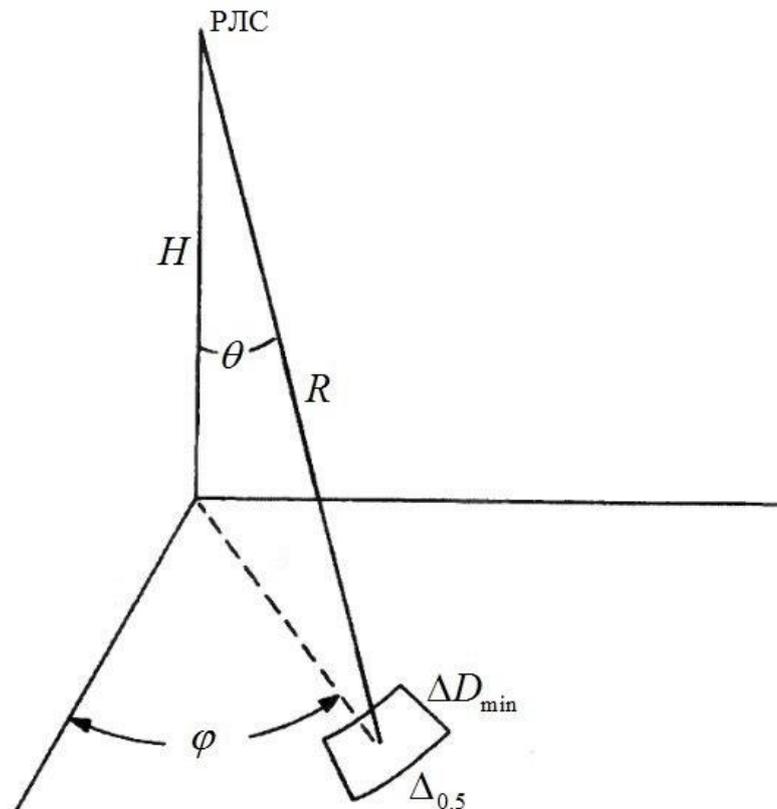


Рисунок 4.1. Система координат для РЛС и поверхности Земли.

В качестве меры интенсивности отражений от земной поверхности принято использовать удельную ЭПР σ^0 (ЭПР единицы площади поверхности). Так как полная ЭПР фрагмента поверхности σ зависит от площади облучаемой области, которая, в свою очередь, зависит от параметров РЛС (ширины ДНА, разрешающей способности по дальности и т.д.), то введение удельной ЭПР σ^0 позволяет использовать характеристику отражающих свойств поверхности, не зависящую от этих параметров.

Удельная ЭПР σ^0 зависит от угла наблюдения, частоты, поляризации сигнала, электрофизических характеристик покрова поверхности и его состояния, а также многих других [13, 15]. Все это порождает большое количество моделей, используемых для аппроксимации этих зависимостей [13, 15, 50, 92-94].

В [50, 92] приведены расчетные соотношения, позволяющие определить зависимость удельной ЭПР σ^0 от угла скольжения, для различного уровня шероховатости рельефа поверхности и разного типа поляризации сигнала. В частности, для рельефа с небольшими шероховатостями (асфальт, бетон, пашня) при рассеянии сантиметровых волн в [50] получена оценочная зависимость σ^0 от угла падения ψ , отсчитываемого от вертикали к поверхности. Также приведены подобные зависимости для поверхности с крупными гладкими и шероховатыми неровностями и многомасштабными неровностями [50].

Для малых углов скольжения на основании экспериментальных данных также получены эмпирические уравнения для определения удельной ЭПР [13, 15, 50, 64, 65]. Приближенная эмпирическая формула удельной ЭПР для углов скольжения $\theta \leq 30^\circ$ и частот $f = 1 \dots 100 \text{ ГГц}$ [50, 96]:

$$\sigma^0(f, \theta), \text{дБ} = A_1 + A_2 \lg\left(\frac{\theta[\text{град.}]}{20}\right) + A_3 \lg\left(\frac{f[\text{ГГц}]}{10}\right), \quad (4.2)$$

где коэффициенты A_1 , A_2 , A_3 , A_4 приведены в Таблице 4.1 для случая согласованной горизонтальной поляризации. Для согласованной вертикальной поляризации значения коэффициентов следует увеличить на 2...3 дБ, для кроссполяризации – уменьшить на 10...15 дБ [50].

Таблица 4.1. Параметры, входящие в уравнение (4.2) для определения УЭПР.

Тип покрова поверхности	Параметры		
	$A_1, \text{дБ} / \text{м}^2$	$A_2, \text{дБ} / \text{м}^2$	$A_3, \text{дБ} / \text{м}^2$
Бетон	-49	32	20
Пашня	-37	18	15
Снег	-34	25	15
Лиственный лес летом до дождя	-20	10	6
Лиственный лес летом после дождя	-15	10	6
Лиственный лес зимой	-40	10	6
Хвойный лес, зимой и летом	-20	10	6
Луг с травой, высотой >0.5 м	-21	10	6
Луг с травой, высотой <0.5 м	-(25...30)	10	6
Городские и сельские здания	-8.5	5	3

Энергетический спектр доплеровских флуктуаций аппроксимируется выражением [50, 96]:

$$G(f) = a^2 \delta(f) + k \left[1 + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^n \right]^{-1}, \quad (4.3)$$

где f – доплеровская частота, Δf – ширина спектра по уровню -3 дБ, которая зависит от скорости ветра, рабочей частоты и типа покрова поверхности, n – коэффициент формы нестабильной части, зависящей от скорости ветра и типа растительности покрова.

Первое слагаемое в выражении (4.3) соответствует стабильной части спектра (отражения от скал, сооружений, поверхности без растительности). Второе слагаемое учитывает нестабильную часть спектра (отражения от поверхностей, покрытых растительностью). Коэффициент a^2 равен отношению стабильной части спектра к среднему значению его нестабильной части и является функцией средней скорости ветра $v_{\text{ср}}$ вблизи поверхности в м/с. Нормирующий коэффициент k приводит к единице площадь под вторым слагаемым. Коэффициенты a^2 и k , а также параметры Δf и n могут быть вычислены следующим образом [50]:

$$a^2 = C v_{\text{ср}}^{-m}, \quad k = \left[\int_0^{\infty} \left(1 + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^n \right) df \right]^{-1}, \quad (4.4)$$

$$\Delta f \cong 0.04 \cdot \frac{v_{\text{ср}}^{1.3}}{\lambda_0}, \quad (4.5)$$

$$n = \frac{2(v_{\text{ср}} + 2)}{(v_{\text{ср}} + 1)} \cdot \left(\frac{100}{f_0 [\Gamma\Gamma\text{ч}]} \right)^{0.2}, \quad (4.6)$$

где C и m – параметры его стабильной части [50]:

$C \approx 10^4 \dots 10^5$, $m = 0$ для городских и сельских зданий;

$C \approx 3 \cdot 10^5 \lambda^2$, $m \approx 3$ для леса;

$C \approx 6 \cdot 10^5 \lambda^2$, $m \approx 3$ для скудной растительности;

$C \approx 10^6 \lambda^2$, $m \approx 3$ для степной поверхности зимой.

Выражение (4.5) для Δf не учитывает сезонные изменения различных видов растительности покрова.

В этом подразделе также уместно остановиться на связи функций распределения по поверхности плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$, определяющих вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики ШК, с разными типами покрова поверхности.

Принято считать, что в пределах элемента разрешения, можно использовать усредненные значения величин, определяющих отражающие свойства поверхности [13, 16, 98-99]. При этом выполняются условия делимости пространственных и временной переменных в указанных функциях:

$$F_r(x, y, z, \tau) = F_r(x, y, z)r(\tau),$$

$$F_s(x, y, z, \tau) = F_s(x, y, z)s(\tau),$$

где $r(\tau)$ - коэффициент корреляции одноименных квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала, отраженного от поверхности, $s(\tau)$ - коэффициент корреляции разноименных квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала, отраженного от поверхности. С точки зрения решения задач имитации данный факт означает, что в пределах фрагмента поверхности с однотипным покровом можно применить результаты, полученные в подразделе 3.3.

Для случая симметричного фрагмента плоской поверхности и при визировании вдоль оси Y [16]:

$$F_s(x, y, \tau) = 0, F_r(x, -y, \tau) = F_r(x, y, \tau), r_{BH}(\tau) = 0. \quad (4.7)$$

Функция $F_r(x, y)$ (1.8), определяющая распределение по поверхности имитируемого объекта плотности интенсивности сигналов его элементарных отражателей, может быть определена, если задано распределение по поверхности ЭПР $\sigma(x, y)$ (для поверхностно-распределенного объекта координату z можно исключить из рассмотрения):

$$F_r(x, y) = k\sigma(x, y), \quad (4.8)$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый мощностью излученного сигнала и дальностью до имитируемого объекта.

4.2. Алгоритм синтеза геометрических моделей, определяющих отражающие свойства земной поверхности

Алгоритм синтеза моделей, определяющих отражающие свойства распределенного объекта, рассмотрим на примере фрагмента статистически неоднородной поверхности Земли. В качестве исходных данных для имитации будем использовать упрощенную топографическую карту поверхности (например, представленную на Рисунке 4.2), а также заданные характеристики распределения по поверхности ЭПР $\sigma(x, y)$ и ширины спектра доплеровских флуктуаций Δf для имеющихся на карте типов покрова поверхности.

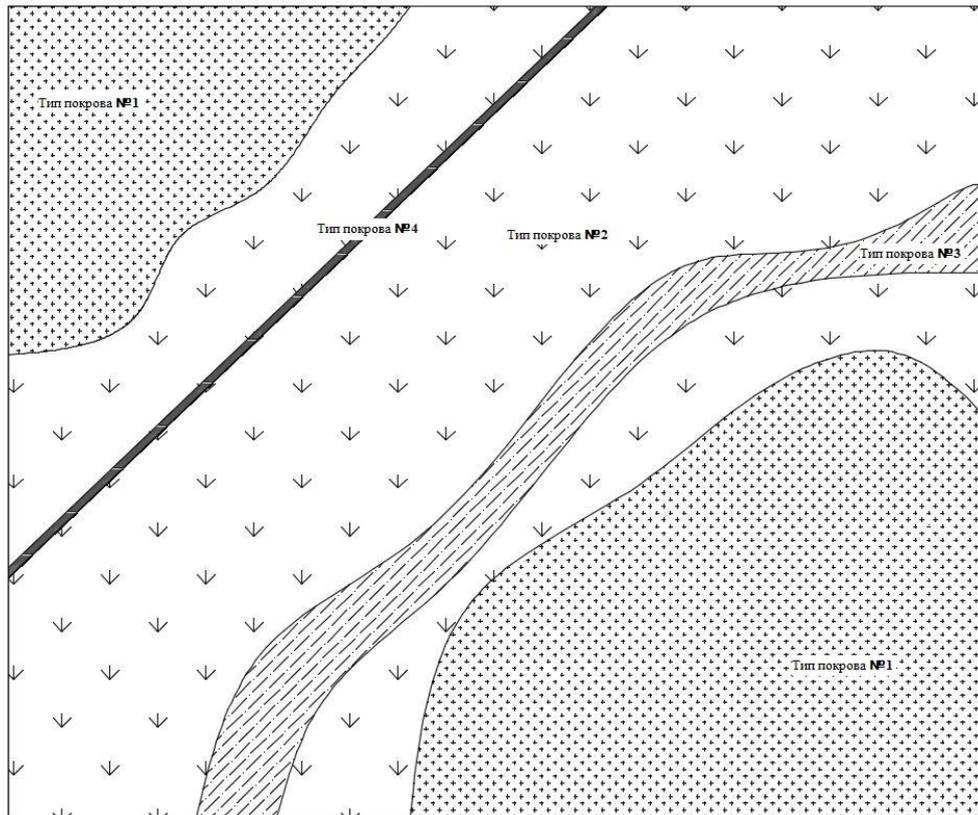


Рисунок 4.2. Фрагмент топографической карты поверхности Земли.

1. Разобьем поверхность на отдельные прямоугольные фрагменты с размерами, равными размерам минимального элемента разрешения, вычисленные согласно (4.1). При этом в элемент разрешения могут попадать несколько соседних элементов разбиения. Результат разбиения части имитируемого фрагмента представлен на Рисунке 4.3.

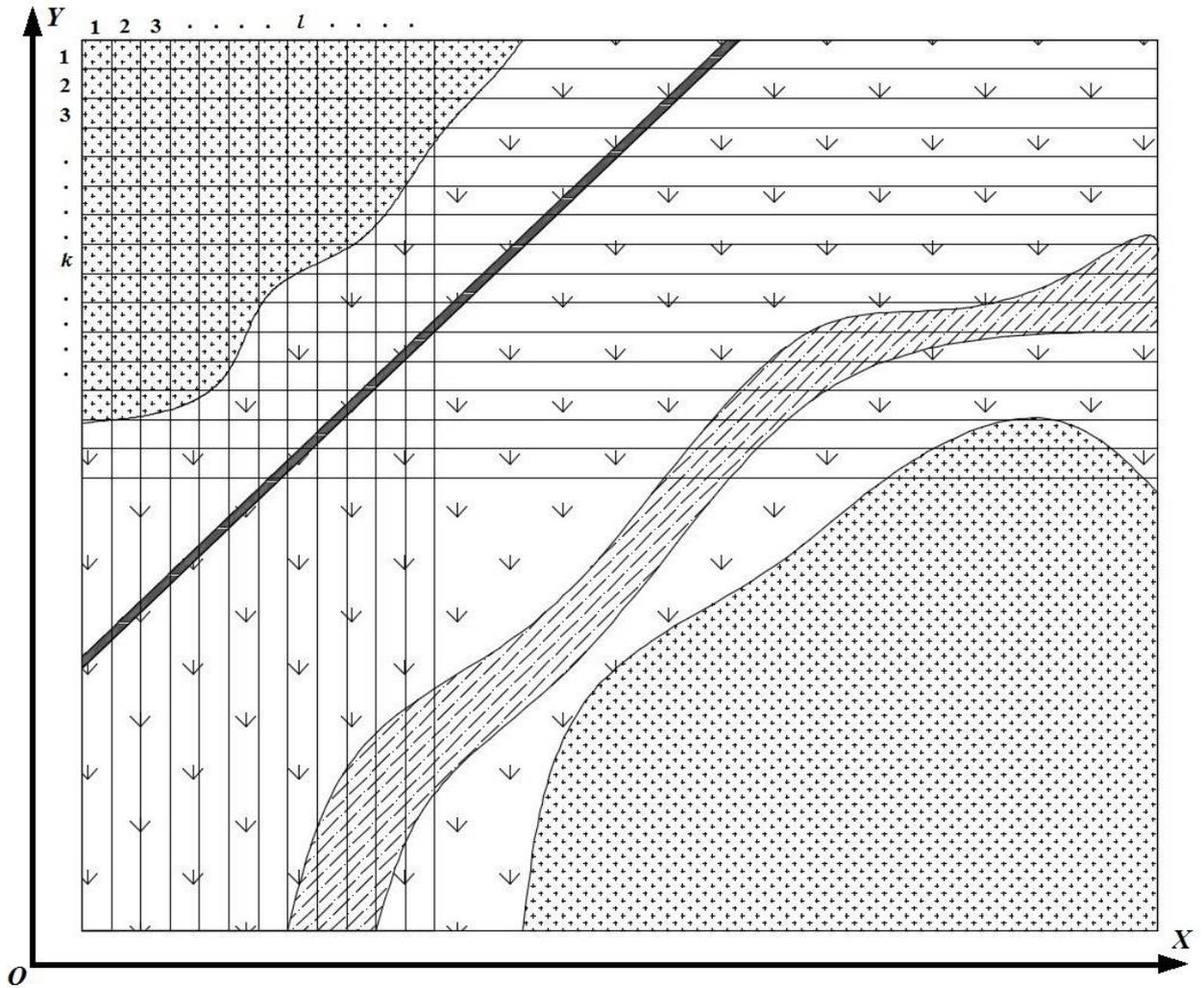


Рисунок 4.3. Разбиение поверхности на прямоугольные элементы.

Как видно, большая часть элементов разбиения содержит один тип покрова. Элементы, содержащие покровы разного типа, заменим элементами с одним типом покрова, выбранного по максимуму следующего коэффициента:

$$k_i = \frac{S_i}{S_{эл} \sigma_i^0}, \quad (4.9)$$

где S_i – площадь, приходящаяся на i -ый тип покрова, σ_i^0 – УЭПР i -го покрова, $S_{эл}$ – общая площадь элемента разбиения.

2. Для каждого (k,l) -го элемента в соответствие с (4.8) определим функцию распределения плотности интенсивностей сигналов отражателей $F_{r_{-(k,l)}}(x, y)$.

3. Поскольку элементы поверхности симметричны и статистически однородные, то для каждого из них справедливы следующие соотношения для определения параметров ПРВ ШК:

$$m_{\gamma_{-(k,l)}} = 0,$$

$$\mu_{\gamma_{-(k,l)}}^2 = \frac{\int F_{r_{-(k,l)}}(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma} \gamma^2 F_{r_{-(k,l)}}(\gamma) d\gamma}. \quad (4.10)$$

Описание отражающих свойств рассматриваемого фрагмента поверхности можно представить в виде матрицы:

$$S = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{K1} & \cdots & \mu_{KL} \end{pmatrix}. \quad (4.11)$$

3. Для каждого элемента, используя выражения (2.25) и (2.38) – (2.40), синтезируем геометрическую модель с инвариантными параметрами ПРВ ШК. Синтез модели осуществляется по следующим шагам.

3.1. По значению $\mu_{\gamma_{-(k,l)}}$ определяем расстояние между излучателями

$L'_{(k,l)}$ для четырехточечной модели согласно (2.25). Располагаем излучатели в соответствие с конфигурацией Рисунка 2.4, совместив центр модели с геометрическим центром элемента. В случае наличия ограничения на значения расстояний между

излучающими точками и выхода полученных $L'_{(k,l)}$ за ограничение следует перейти к пункту 3.2.

3.2. По значению $\mu_{\gamma_{-(k,l)}}$ определяем соотношения между мощностью центрального излучателя и остальных излучателей $\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)_{k,l}$ для пятиточечной модели согласно (2.40). Располагаем излучатели в соответствие с конфигурацией Рисунка 2.6, совместив центр модели с геометрическим центром элемента. Данная модель допускает вольность в выборе расстояний между излучателями.

Таким образом, матрицу (4.10), определяющую отражающие свойства поверхности можно представить в виде совокупности двух матриц:

$$S_4 = \begin{pmatrix} L'_{11} & \dots & L'_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_{K1} & \dots & L'_{KL} \end{pmatrix} \text{ и } S_5 = \begin{pmatrix} (\sigma_0/\sigma)_{1,1} & \dots & (\sigma_0/\sigma)_{1,L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (\sigma_0/\sigma)_{K,1} & \dots & (\sigma_0/\sigma)_{K,L} \end{pmatrix}, \quad (4.12)$$

где (k,l) -й элемент будет ненулевым только в одной из матриц.

4. Спектральные характеристики отражений для каждого элемента разбиения поверхности заложены в функции $r(\tau)$, которую можно определить как:

$$r(\tau) = A \cdot R_s(\tau) \cdot R_D(\tau), \quad (4.13)$$

где $R_s(\tau)$ - корреляционная функция зондирующего сигнала, $R_D(\tau)$ - корреляционная функция доплеровских флуктуаций (может быть получена путем обратного преобразования Фурье от энергетического спектра (4.4)), A - коэффициент пропорциональности, определяемый энергетикой зондирующего сигнала и доплеровских флуктуаций.

В пределах элемента разбиения предполагаем, что функция $r(\tau)$ одинакова для всех отражателей внутри этого элемента. Подобная идея не нова и многократно использована в работах [14-16, 51, 99-100].

Используя рассмотренный алгоритм, можно получить описание отражающих свойств поверхности, инвариантное к месту расположения РЛС.

4.3. Алгоритм имитации отражений от поверхности Земли на основе двумерных некогерентных геометрических моделей

Предложенный алгоритм может быть разбит на три этапа:

1. Формирование матрицы распределения УЭПР покровов имитируемого фрагмента поверхности по цифровой карте местности.
2. Синтез двумерных геометрических моделей, достоверно воспроизводящих ПРВ ШК отдельного элемента разрешения.
3. Формирование сигналов излучателей геометрических моделей с учетом спектрально-корреляционных характеристик эхосигнала и ШК.

Для реализации первого этапа предложенного алгоритма имитации разработано специализированное программное обеспечение (ПО) «MAP Converter». В качестве исходных данных для работы ПО использует цифровые топографические, специальные или навигационные карты местности в формате SXF [101-102]. Формат SXF является открытым форматом цифровой информации о местности. Применяется в геоинформационных системах для хранения цифровой информации о местности, обмена данными между различными системами, создания цифровых и электронных карт и решения многих прикладных задач. Является основным обменным форматом цифровой информации о местности в Вооруженных Силах РФ.

Главное окно «MAP Converter» показано на Рисунке 4.4.

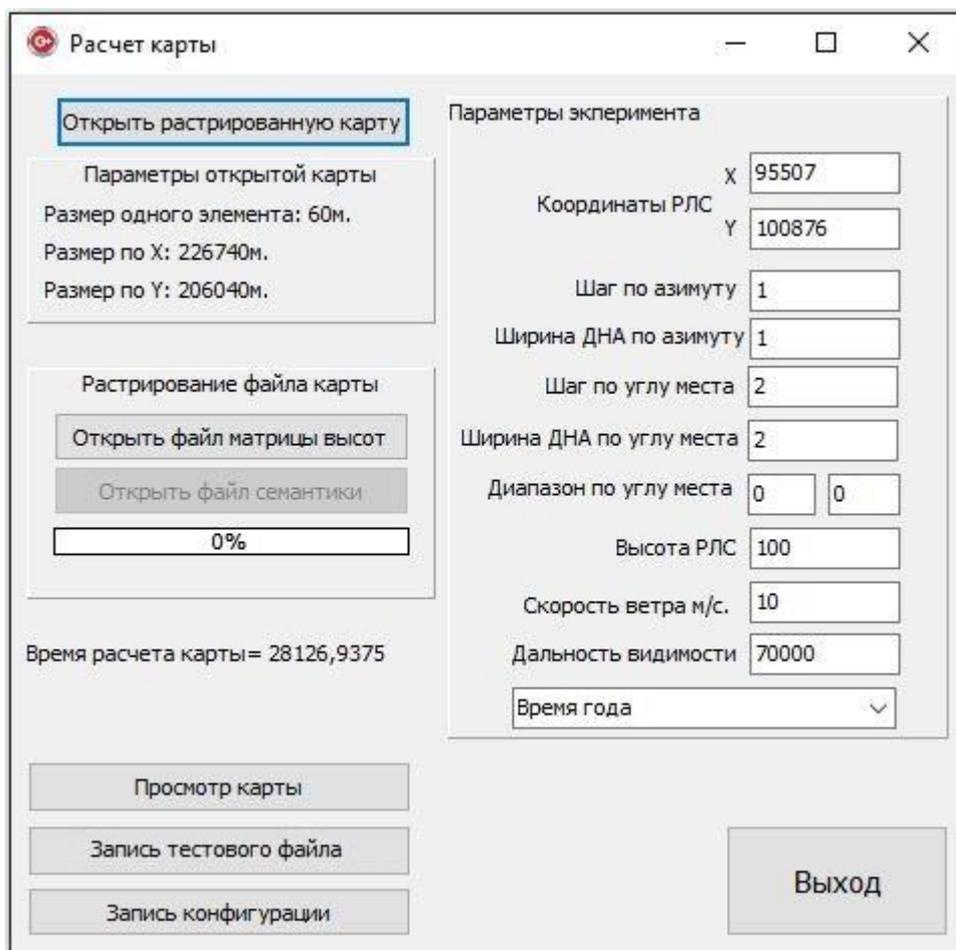


Рисунок 4.4. Главное окно ПО «MAP Converter».

Параметры моделируемой ситуации (координаты РЛС в системе Гаусса-Крюгера, высота РЛС, направление и скорость ветра и другие) считываются из предварительно подготовленного бинарного файла и отображаются пользователю в окне «Параметры эксперимента». При работе в составе ПО комплекса имитации эхосигналов параметры эксперимента через информационный канал связи в РМВ поступают с РЛС. В тестовом режиме возможно вручную записать данные в окне «Параметры тестового файла» (Рисунок 4.5).

ПО «MAP Converter» позволяет по исходной карте и дополнительным параметрам моделируемой ситуации рассчитать распределение УЭПР покровов в зоне действия РЛС с учетом затенений. При нажатии кнопки

«Просмотр карты» открывается окно «Вид карты» (Рисунок 4.6), которое содержит распределение УЭПР покровов имитируемого фрагмента поверхности в прямоугольной системе координат и ЭПР каждого элемента разрешения в полярной системе координат. Для удобства визуального наблюдения полученных результатов предусмотрено повышение контрастности изображения путем гамма-коррекции. Кроме того, представлена карта высот, расположение объектов на карте в прямоугольной системе координат, и расположение объектов в пределах рассматриваемого фрагмента в полярной системе координат.

Идентификатор местности	8
Координата X реперной точки в СК Г.К.	5858957
Координата Y реперной точки в СК Г.К.	9394846
Координата H реперной точки в СК Г.К.	100
Номер зоны в СК Г.К.	5
Координата X точки разъезда относительно реперной точки	0
Координата Y точки разъезда относительно реперной точки	0
Координата H точки разъезда относительно реперной точки	0
Координата X точки стояния СОЦ относительно точки разъезда	0
Координата Y точки стояния СОЦ относительно точки разъезда	0
Координата H точки стояния СОЦ относительно точки разъезда	0
Код времени года	1
Код времени суток	1
Код погодных условий	0
Код прозрачности атмосферы	0
Код облачности	1
Направление ветра (1 градус)	0
Сила ветра (1 м/с)	10

Buttons: Записать файл, Выход

Рисунок 4.5. Окно «Параметры тестового файла» ПО «MAP Converter».

ПО «MAP Converter», по сути, позволяет подготовить исходные данные для второго этапа алгоритма имитации и предоставляет пользователю информацию об рельефе местности, объектах на карте и их отражающей способности с учетом затенений.

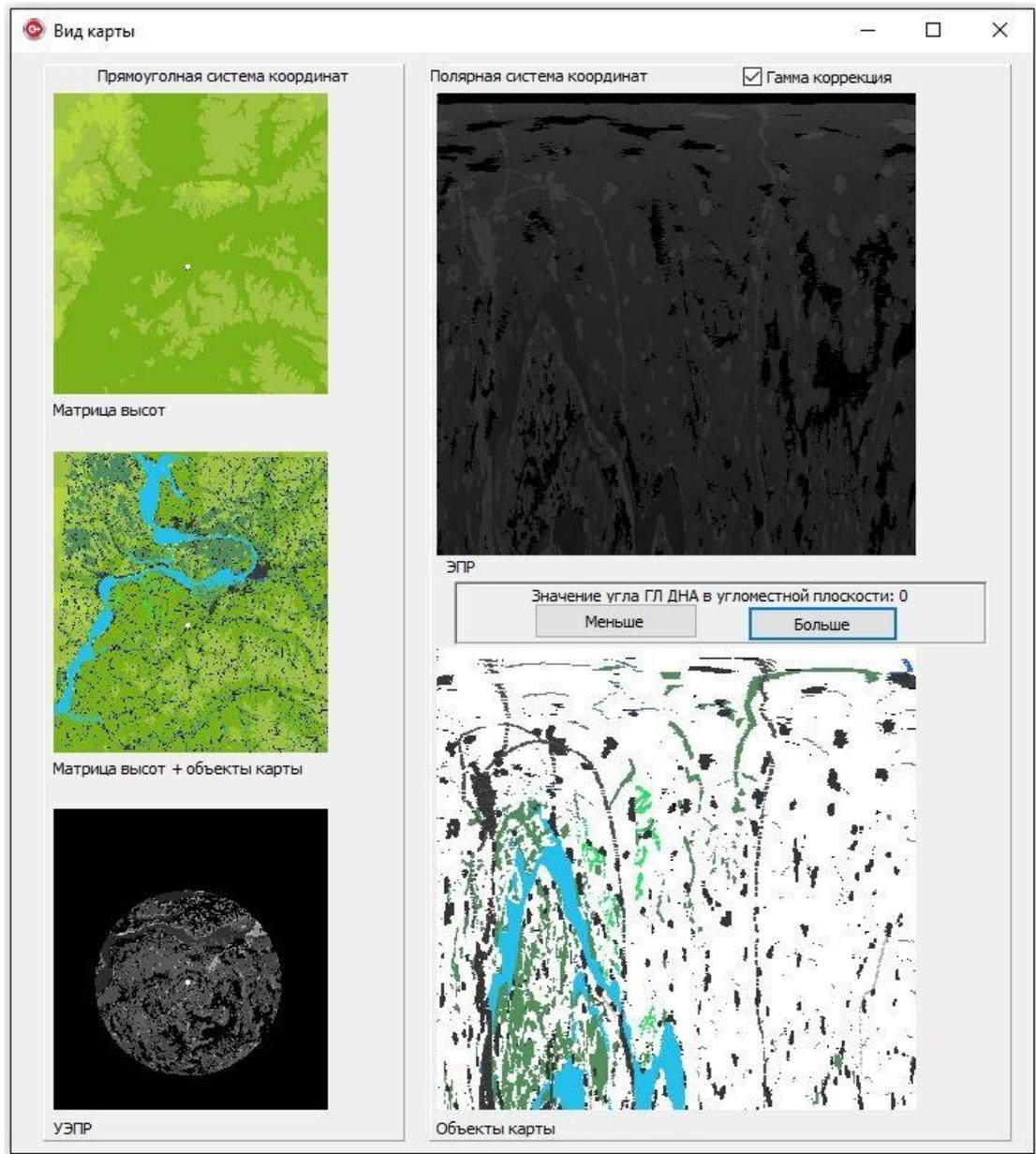


Рисунок 4.6. Окно «Вид карты» ПО «MAP Converter».

ПО, реализующее второй этап алгоритма имитации, используя значения ЭПР для каждого элемента разбиения $\sigma_{(k,l)}$, полученные с помощью ПО «MAP Converter» рассчитает значения функции $F_{r_{(k,l)}}(x, y)$ согласно выражению (4.9) с учетом заданного коэффициента k для конкретной РЛС. Поскольку разбиение карты местности производилось на квадратные элементы, то функция $F_{s_{(k,l)}}(x, y, \tau) = 0$, а также $m_{\gamma_{(k,l)}} = 0$. Значение

параметра $\mu_{\gamma_{(k,l)}}$ для элемента разрешения (k,l) определяется по выражению (4.10).

Поскольку разбиение производилось на симметричные элементы с одним типом покрова для замещения фрагмента следует использовать инвариантную к углу визирования модель. Используем наиболее простую четырехточечную модель (Рисунок 2.4).

Используемая модель симметричная, поэтому ее можно располагать в пределах элемента разбиения под разными углами к источнику сигнала. Для упрощения процедуры имитации ориентируем все модели одинаковым образом, совместив геометрические центры модели и элемента разбиения в прямоугольной системе координат.

Для сокращения количества излучателей следует, пользуясь принципом декомпозиции (доказанном в подразделе 3.2) объединять по возможности большее количество соседних элементов разбиения с одинаковым типом покрова в симметричные фрагменты, замещаемые одной моделью (Рисунок 4.7, в пределах рисунка граница покровов выделена толстой сплошной линией).

	<i>фрагмент №1</i>		<i>фрагмент №2</i>		<i>фрагмент №i</i>	
•	•	•	•	•	(x_{3_phi}, y_{3_phi})	(x_{1_phi}, y_{1_phi})
			•	•	(x_{y_phi}, y_{y_phi})	
			<i>тип покрыва №1</i>		(x_{2_phi}, y_{2_phi})	(x_{4_phi}, y_{4_phi})
•	•		<i>тип покрыва №2</i>		•	•
• •	• •	• •	•	•	•	•
• •	• •	• •				

Рисунок 4.7. Участок отражающей поверхности с двумя типами покрывов, замещаемый совокупностью четырехточечных моделей.

Координаты излучателей модели можно определить по следующим соотношениям:

$$\text{Излучатель №1: } \begin{cases} x_{1_phi} = x_{y_phi} + \frac{L_{phi}}{2\sqrt{2}} d_{phi} \\ y_{1_phi} = y_{y_phi} + \frac{L_{phi}}{2\sqrt{2}} d_{phi} \end{cases} ; \quad (4.14)$$

$$\text{Излучатель №2: } \begin{cases} x_{2_phi} = x_{y_phi} - \frac{L_{phi}}{2\sqrt{2}} d_{phi} \\ y_{2_phi} = y_{y_phi} - \frac{L_{phi}}{2\sqrt{2}} d_{phi} \end{cases} ;$$

$$\text{Излучатель №3: } \begin{cases} x_{3_phi} = x_{y_phi} - \frac{L_{phi}}{2\sqrt{2}} d_{phi} \\ y_{3_phi} = y_{y_phi} + \frac{L_{phi}}{2\sqrt{2}} d_{phi} \end{cases} ;$$

$$\text{Излучатель №4: } \begin{cases} x_{4_fi} = x_{u_fi} + \frac{L_{fi}}{2\sqrt{2}} d_{fi} \\ y_{4_fi} = y_{u_fi} - \frac{L_{fi}}{2\sqrt{2}} d_{fi} \end{cases},$$

где (x_{j_fi}, y_{j_fi}) – координаты j -го излучателя модели i -го фрагмента;
 (x_{u_fi}, y_{u_fi}) – координаты центра замещаемого i -го фрагмента; d_{fi} – размер замещаемого i -го фрагмента; L_{fi} – размер модели, рассчитываемый по формуле:

$$L_{fi} = \frac{2\sqrt{2}}{\mu_{fi}}. \quad (4.15)$$

В данном случае справедлива делимость пространственных и временной переменных в функциях $F_{r_-(k,l)}(x, y, \tau)$, т.е.

$$F_{r_-(k,l)}(x, y, \tau) = F_{r_-(k,l)}(x, y) r_{\infty_-(k,l)}(\tau), \quad (4.16)$$

где $r_{\infty_-(k,l)}(\tau)$ – коэффициент корреляции одноименных квадратур комплексной огибающей сигнала, отраженного от элемента разрешения (k, l) . Следовательно, к излучателям модели следует подводить сигналы с корреляционными функциями (см. подразделы 3.3, 3.4.1):

$$R_{i_f}(\tau) = \frac{\sigma_{H_f}^2}{4} r_{\infty_-(k,l)}(\tau).$$

Или, используя выражение (4.13), можно записать:

$$R_{i_f}(\tau) = \frac{\sigma_{H_f}^2}{4} A \cdot R_s(\tau) \cdot R_{D_-(k,l)}(\tau), i = 1, 2, 3, 4, \quad (4.17)$$

где $\sigma_{H-\phi}^2 = \iint_{x,y} F_{r-\phi}(x,y) dx dy$, $R_{D-(k,l)}(\tau) = F^{-1}(G_{D-(k,l)}(\omega))$, $F^{-1}(\cdot)$ – обратное преобразование Фурье.

Для того, чтобы сформировать сигналы, подаваемые на излучатели модели, необходимо вначале для каждого излучателя сформировать узкополосный шумовой сигнал с заданной СПМ:

$$\dot{u}_{i,j} = h_{D-\phi i} \otimes \dot{n}_j, \quad (4.18)$$

где \dot{u}_j – комплексный шумовой сигнал j -го излучателя модели i -го фрагмента, $h_{D-\phi i}$ – импульсная характеристика цифрового фильтра с коэффициентом передачи $|K(j\omega)| \sim G_{D-\phi i}(\omega)$, $G_{D-\phi i}(\omega)$ – доплеровский спектр для i -го фрагмента поверхности, \dot{n}_j – комплексные отсчеты нормального случайного процесса с нулевым средним и единичной дисперсией, имеющий равномерную на всей частотной оси СПМ. Случайные процессы \dot{n}_j , формируемые для отдельных излучателей, не должны быть коррелированы друг с другом.

Сигнал, подаваемый на j -й излучатель модели i -го фрагмента, представляет собою произведение шумового сигнала \dot{u}_j и зондирующего сигнала, умноженное на весовой коэффициент K , определяемый $\sigma_{H-\phi}^2$ и энергетикой зондирующего сигнала:

$$\dot{s}_{i,j} = \frac{\sigma_{H-\phi i}^2}{4} \cdot K \cdot (\dot{u}_{i,j} \cdot \dot{s}_{\text{зонд.}}), \quad (4.19)$$

Осуществим проверку предложенного алгоритма имитации путем математического моделирования.

Выполним математическое моделирование процесса обработки сигналов радиолокационной станцией методом амплитудной моноимпульсной пеленгации [103].

Целью математического моделирования является сравнение характеристик ШК фрагмента поверхности Земли, замещенного многоточечной геометрической моделью с соответствующими характеристиками для четырехточечной геометрической модели.

Метод моноимпульсной пеленгации предполагает определение пеленгационного соотношения в следующей виде:

$$f(\gamma) = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_{\Delta}}{\dot{U}_{\Sigma}} \right), \quad (4.20)$$

где $f(\gamma)$ - пеленгационное соотношение, γ - ошибка пеленгации, \dot{U}_{Δ} и \dot{U}_{Σ} - сигналы соответственно разностного и суммарного каналов.

Фрагмент статистически однородной поверхности Земли замещается совокупностью большого числа точек, расположенных симметрично относительно осей координат. Сигнал, излучаемый каждой точкой, моделируется случайным процессом с нормальным распределением мгновенных значений. Мощность сигналов принималась равной. СПМ сигналов излучателей рассчитана согласно выражению (4.4).

Положение излучателей четырехточечной модели и сигналы, подводимые к ним, определены в соответствие с предложенным алгоритмом по выражениям (4.14), (4.15), (4.18), (4.19).

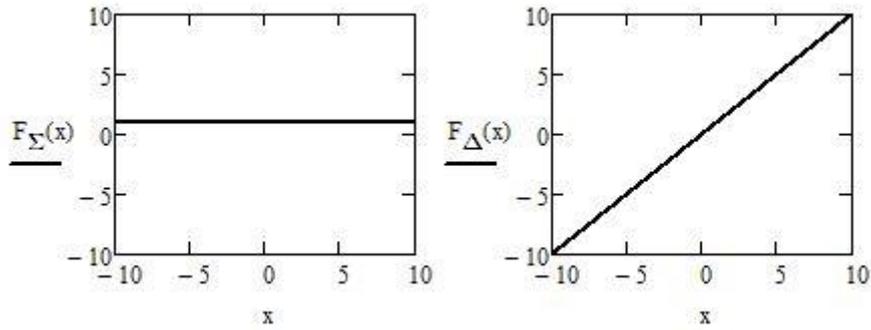


Рисунок 4.8. ДНА суммарного и разностного каналов

Для определения одного отсчета пеленгационного соотношения необходимо произвести вычисление следующего выражения:

$$f_i(\gamma) = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_{\Sigma i}}{\dot{U}_{\Delta i}} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=1}^{N^2} F_{\Sigma}(\gamma_j) n_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N^2} F_{\Delta}(\gamma_j) n_{i,j}} \right), \quad (4.21)$$

где $f_i(\gamma)$ – i -ый отсчет пеленгационного соотношения; $\dot{U}_{\Sigma i}, \dot{U}_{\Delta i}$ – i -ый отсчет сигналов суммарного и разностного каналов соответственно; γ_j – положение j -ой точки на прямой перпендикулярной линии визирования объекта; $F_{\Sigma}(\gamma), F_{\Delta}(\gamma)$ – ДНА суммарного и разностного каналов соответственно (см. Рисунок 4.8); $n_{i,j}$ – i -ый отсчет сигнала, излучаемого j -ой точкой.

Оценка ПРВ ШК по выборке отсчетов пеленгационного соотношения для обеих моделей производилась гистограммным методом [104-106]. Пример полученной оценки ПРВ ШК приведен на Рисунке 4.9 (для угла визирования 0 градусов – см. Рисунок 2.4) и на Рисунке 4.10 (для угла визирования 45 градусов). Данная оценка ПРВ получена при замещении реального объекта моделью, состоящей из 100 (10x10) точек. Для построения гистограммы эмпирической функции плотности был произведен расчет

16384 отсчета пеленгационного соотношения $f(\gamma)$, которые в соответствии с методом гистограмм были распределены в 100 равных интервалов группирования. Кроме того, было произведено обнаружения и исключение аномальных значений с помощью задания порога принятия решения об аномальности [107].

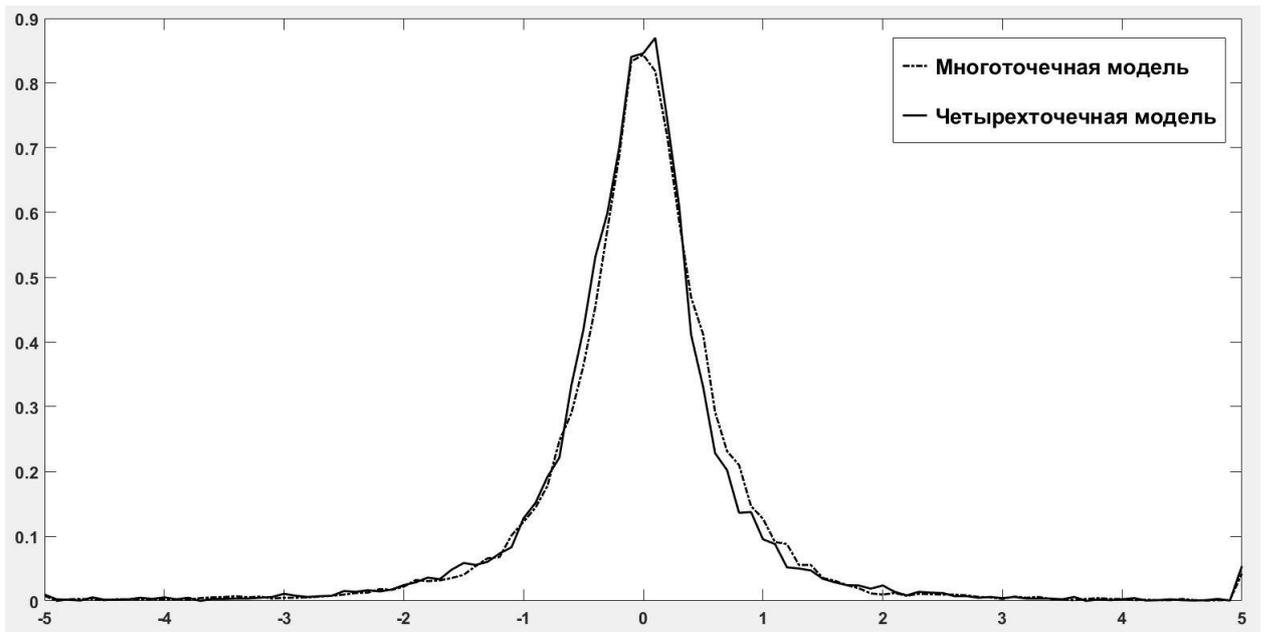


Рисунок 4.9. Сравнение оценок ПРВ ШК многоточечной модели (100 излучателей) и четырехточечной модели фрагмента статистически однородной поверхности Земли. Угол визирования 0 градусов.

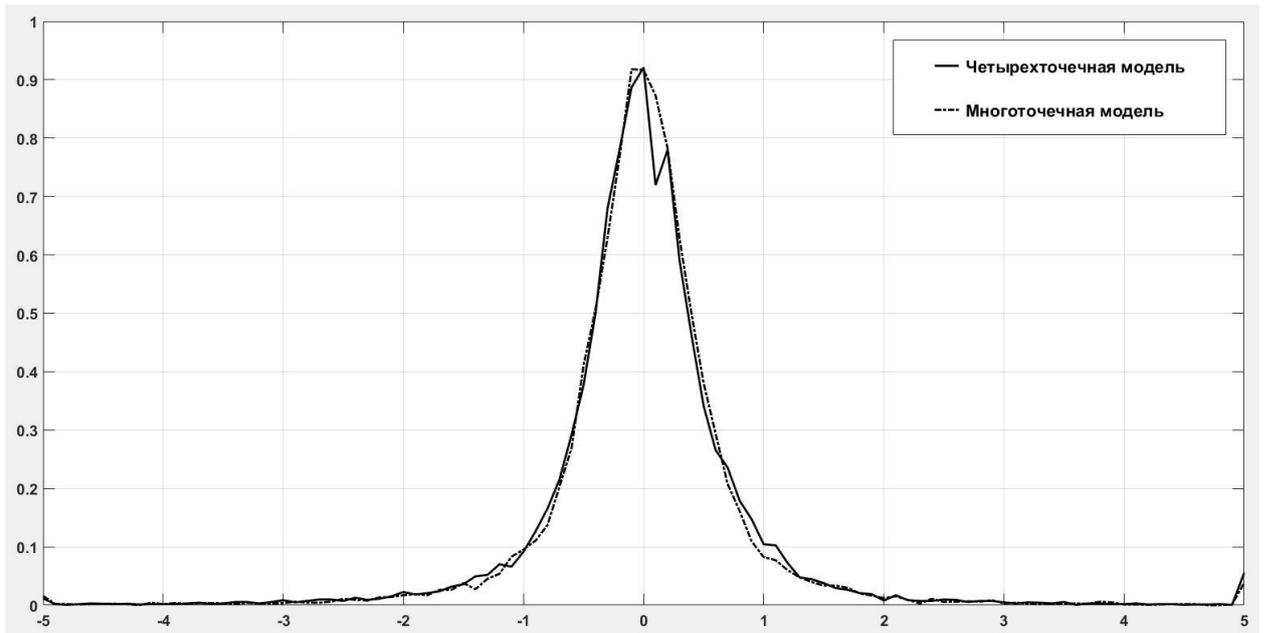


Рисунок 4.10. Сравнение оценок ПРВ ШК многоточечной модели (100 излучателей) и четырехточечной модели фрагмента статистически однородной поверхности Земли. Угол визирования 45 градусов.

Рассчитав автокорреляционную функцию для массива значений $f_i(\gamma)$, можно определить корреляционную функцию (КФ) ШК геометрической модели фрагмента поверхности Земли. Нормированные КФ ШК модели из 100 излучателей и четырехточечной модели приведены на Рисунке 4.11 (для угла визирования 0 градусов) и Рисунке 4.12 (для угла визирования 45 градусов).

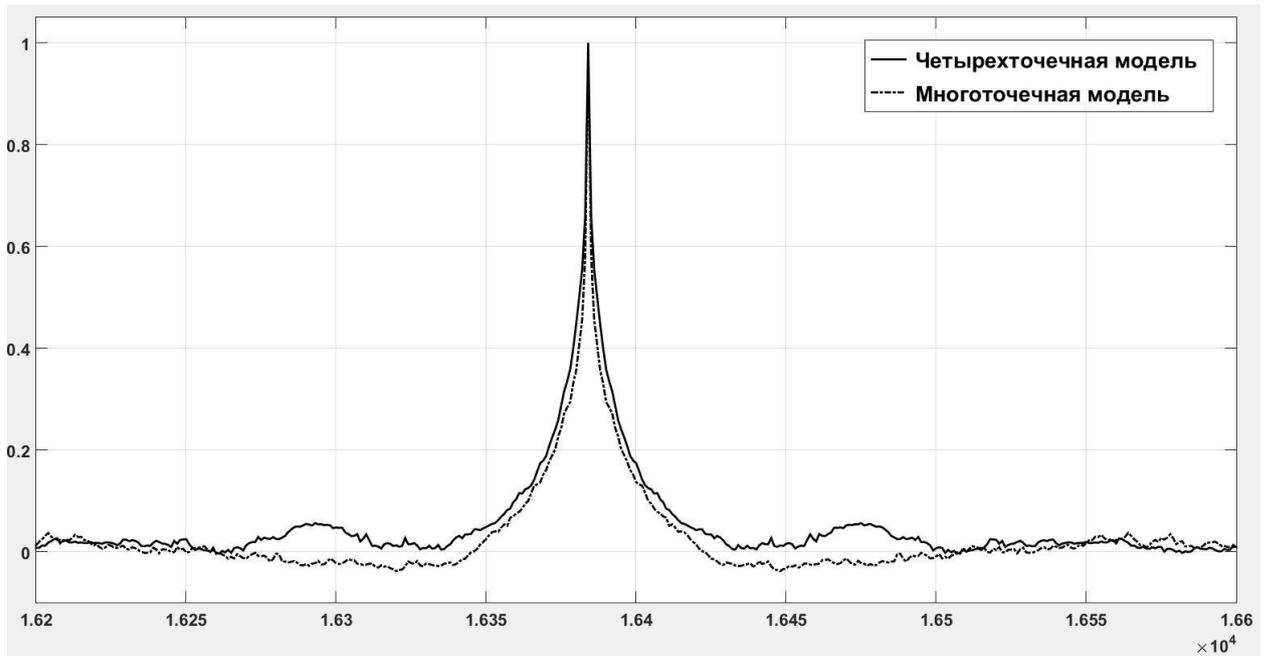


Рисунок 4.11. Сравнение КФ ШК многоточечной модели (100 излучателей) и четырехточечной модели фрагмента статистически однородной поверхности Земли. Угол визирования 0 градусов.

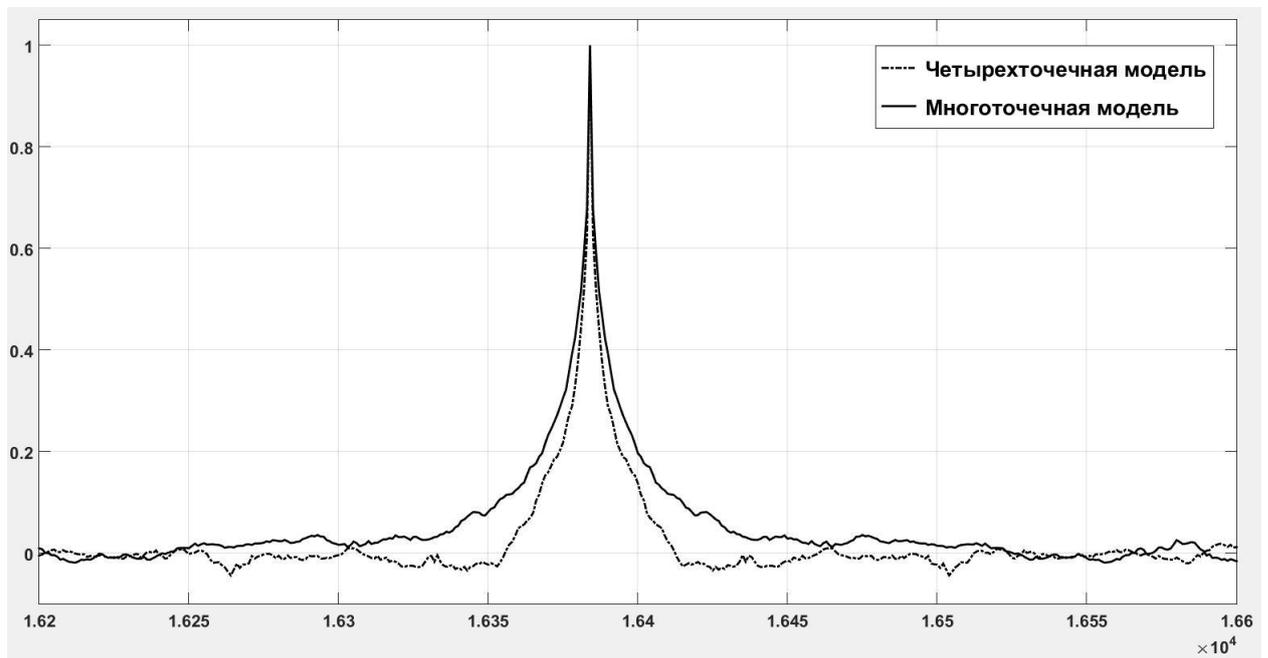


Рисунок 4.12. Сравнение КФ ШК многоточечной модели (100 излучателей) и четырехточечной модели фрагмента статистически однородной поверхности Земли. Угол визирования 45 градусов.

Результаты математического моделирования (а именно сравнение ПРВ ШК, КФ ШК) свидетельствуют о высокой точности совпадения указанных характеристик для многоточечной и четырехточечной моделей фрагмента поверхности Земли и являются доказательством достоверности предложенного алгоритма имитации.

Как отмечается в [118], для адекватной имитации эхосигнала одного элемента разрешения радиофизической сцены в УВЧ, СВЧ диапазонах необходимо учитывать отражающие свойства $10^9 \div 10^{10}$ элементов, образующих поверхность (что требует колоссальной производительности – порядка $1.4 \cdot 10^{14} \div 1.4 \cdot 10^{19}$ арифметических операций в секунду). Использование разработанного алгоритма имитации позволяет сократить количество точек модели на порядки. Так, для имитации отражений фрагмента земной поверхности размером 2 км на 2 км при минимальном размере элемента разрешения в 50 м согласно предложенному алгоритму требуется примерно 6400 точек модели.

4.4. Обобщенный алгоритм синтеза геометрических моделей и имитации отраженных сигналов

На основе полученных в предыдущих разделах результатов можно предложить следующий обобщенный алгоритм синтеза моделей, определяющих отражающие свойства поверхности.

1. В качестве исходного материала для имитации будем использовать топографическую карту поверхности.

2. Выделить фрагменты с одинаковым типом покрова поверхности. Используя справочные материалы, задать отражающие свойства поверхности в виде распределения УЭПР $\sigma(x, y)$ и СПМ доплеровских флуктуаций $G_D(x, y, \omega)$.

3. Перейти от $\sigma(x, y)$ и $G_D(x, y, \omega)$ к функциям распределения по поверхности плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$.
4. Определить, допускают ли функции $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ разделимость пространственных и временной переменных.
5. По функциям $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ определить параметры ПРВ ШК m_γ и μ_γ в некотором диапазоне значений угла визирования.
6. Выбор типа моделей для отдельных фрагментов по следующим требованиям.
 - 6.1. Требуется модель с инвариантными к углу визирования параметрами ПРВ ШК. Перейти к пункту 7.
 - 6.2. Требуется модель с заданными параметрами ПРВ ШК по двум ортогональным направлениям визирования. Перейти к пункту 8.
 - 6.3. Необходимо обеспечить требуемые параметры ПРВ ШК только для одного направления визирования. Перейти к пункту 9.
7. Необходимо обеспечить независимое управления параметрами m_γ и μ_γ ?. В случае положительного ответа перейти к подпункту 7.1. В противном случае – к подпункту 7.2.
 - 7.1. Синтез пятиточечной модели по выражениям (2.39) путем изменения расстояния между излучателями.
 - 7.1.1. Проверить могут ли излучатели занимать такое положение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 7.1.2.
 - 7.1.2. Синтез пятиточечной модели по выражениям (2.40) путем изменения соотношения между мощностями сигналов излучателей.

- 7.1.3. Проверить возможно ли получить такое соотношение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 7.1.4.
- 7.1.4. Синтез девятиточечной модели по выражениям (2.45) путем изменения расстояния между излучателями.
- 7.1.5. Проверить могут ли излучатели занимать такое положение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 7.1.6.
- 7.1.6. Синтез девятиточечной модели по выражениям (2.46) путем изменения соотношения между мощностями сигналов излучателей.
- 7.1.7. Проверить возможно ли получить такое соотношение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 7.1.8.
- 7.1.8. Провести декомпозицию текущего фрагмента. Перейти к пункту 4.
- 7.2. Синтез четырехточечной модели по выражениям (2.25) путем изменения расстояния между излучателями.
- 7.2.1. Проверить могут ли излучатели занимать такое положение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 7.2.2.
- 7.2.2. Провести декомпозицию текущего фрагмента. Перейти к пункту 4.
8. Выполнить следующие шаги.

- 8.1. Синтез пятиточечной модели по выражениям (2.34) путем изменения положения излучателей модели.
 - 8.1.1. Проверить, могут ли излучатели занимать такое положение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 8.2.
- 8.2. Синтез пятиточечной модели по выражениям (2.34) путем изменения мощностей сигналов излучателей модели.
 - 8.2.1. Проверить возможно ли получить такие значения мощностей? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 8.3.
- 8.3. Синтез девятиточечной модели по выражениям (2.43) и (2.44) путем изменения положения излучателей модели.
 - 8.3.1. Проверить могут ли излучатели занимать такое положение? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 8.4.
- 8.4. Синтез девятиточечной модели по выражениям (2.43) и (2.44) путем изменения мощностей сигналов излучателей модели.
 - 8.4.1. Проверить возможно ли получить такие значения мощностей? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 8.5.
- 8.5. Провести декомпозицию текущего фрагмента. Перейти к пункту 4.
9. Необходимо обеспечить независимое управления параметрами m_γ и μ_γ ?. В случае положительного ответа перейти к подпункту 9.1. В противном случае – к подпункту 9.2.

9.1. Синтез двухточечной модели по выражениям (2.7) и (2.8).

9.1.1. Проверить могут ли излучатели занимать такое положение и иметь полученное значение мощностей сигналов? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 9.2.

9.2. Синтез трехточечной модели по выражениям (2.15).

9.2.1. Проверить могут ли излучатели занимать такое положение и иметь полученное значение мощностей сигналов? При положительном ответе перейти к расчету СПМ сигналов излучателей в пункте 10. При отрицательном ответе перейти к пункту 9.3.

9.3. Провести декомпозицию текущего фрагмента. Перейти к пункту 4.

10. В случае положительного ответа в пункте 4, рассчитать корреляционные функции сигналов, подводимых к каждому излучателю модели по коэффициентам корреляции эхосигнала от объекта согласно (3.25). Во многих случаях удобнее рассматривать СПМ сигналов излучателей. Для расчета СПМ сигналов излучателей любой из рассмотренных в разделе 2 моделей следует воспользоваться Таблицей 3.1. В случае отрицательного ответа в пункте 4 перейти к пункту 11.

11. Расчет СПМ сигналов излучателей для моделей, не допускающих независимое управление параметрами ПРВ ШК (Рисунок 2.1 и 2.5), можно осуществлять по формулам Таблицы 3.2. При этом, как было доказано в разделе 3, в общем случае такие модели позволяют добиться достоверного моделирования ШК только на одной частоте.

Расчет СПМ сигналов для моделей, допускающих независимое управление параметрами ПРВ ШК, следует выполнять по формулам Таблицы 3.3. При этом исходными данными для расчета являются частотные

зависимости параметров ПРВ ШК $\mu_{\gamma\infty}(\omega)$ и $m_{\gamma\infty}(\omega)$ имитируемого объекта. Модель может быть реализована, если при заданном $m_{\gamma\infty}(\omega^*)$ значение параметра $\mu_{\gamma\infty}(\omega^*)$ укладывается в диапазон возможных значений $[\mu_{\gamma\min}, \mu_{\gamma\max}]$, обеспечиваемых моделью, где ω^* – некоторая фиксированная частота. Последнее, разумеется, не относится к симметричным моделям.

- 11.1. Если модель окажется нереализуемой, следует провести повторную декомпозицию текущего фрагмента и перейти к пункту 4.

4.5. Заключение по четвертому разделу

1. На основе полученных в разделах 2 и 3 теоретических результатов разработан алгоритм, позволяющий синтезировать двумерные геометрические модели фрагмента статистически неоднородной поверхности Земли. В качестве исходных данных для алгоритма используется топографическая карта поверхности и заданные распределения по поверхности ЭПР и ширины спектра доплеровских флуктуаций для имеющихся на карте типов покрова поверхности.

2. Разработан алгоритм имитации отражений от статистически неоднородного фрагмента поверхности Земли на основе двумерных геометрических моделей, позволяющий достоверно моделировать ШК этого фрагмента. В результате численных экспериментов, заключающихся в вычислении ПРВ и КФ ШК малоточечной и многоточечной моделей фрагмента поверхности, была подтверждена адекватность синтезированных моделей. Подтверждено совпадение экспериментальных оценок указанных характеристик при изменении угла визирования моделей. Результаты сравнения не выявили расхождений, превышающих погрешности получения самих экспериментальных оценок.

3. Сформулирован обобщенный алгоритм синтеза геометрических моделей поверхностно-распределенного объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены научно-технические задачи, связанные с применением малоточечных некогерентных геометрических моделей для имитации отражений от поверхностно-распределенных объектов.

Получены следующие основные результаты.

1. Определена структура и получены соотношения для синтеза двумерных геометрических моделей, обеспечивающих независимое управление параметрами ШК по двум угловым координатам, а также моделей, обладающих инвариантностью конфигурации к углу визирования.

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

3. Разработан спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов. Данный подход позволяет по спектральным характеристикам эхосигналов точек моделируемого распределенного объекта определить СПМ сигналов, подаваемых на излучатели геометрической модели и обеспечивающие достоверную имитацию.

4. Предложен способ задания отражающих свойств поверхностно-распределенных объектов через характеристики ШК. Данный подход предполагает декомпозицию поверхностно-распределенного объекта на отдельные фрагменты, с последующим замещением каждого геометрической моделью.

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

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

2. Показано, что при разделимости пространственных и временной переменных в функциях распределения плотности автокорреляции и взаимной корреляции по поверхности моделируемого объекта, имитация отражений сводится к обеспечению заданных значений параметров распределения ШК. При этом корреляционные функции сигналов отражателей модели с точностью до постоянного множителя совпадают с корреляционными функциями эхосигнала от моделируемого объекта.

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

Полученные в работе результаты дают основание утверждать, что решены задачи, имеющие существенное значение для имитации отражений поверхностно-распределенных объектов.

Теоретические результаты доведены до уровня рекомендаций по разработке средств имитации, а также проведения математического и имитационного моделирования отражений поверхностно-распределенных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тверской Г. Н., Харченко Г. К., Терентьев И. П. Имитаторы эхосигналов судовых радиолокационных станций. – Л.: Судостроение, 1973. – 224 с.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. / Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. — М.: Радио и связь, 1988.
3. Урсатьев А. А., Погребная Н. П. Полунатурная модель сигнально-помеховой радиолокационной обстановки. // Управляемые системы и машины. — 1991. — №4. — С.102–111.
4. Миронов В. М. Некоторые вопросы теории проектирования высокоточных имитационных систем РЛС. // Сб. трудов Ленинградского института авиационного приборостроения. — Л., 1968. — вып. 55. — С.151–157.
5. Основные принципы построения моделирующих навигационных комплексов / Рисенберг В. Х., Щаренский В. А., Процицкий И. П. и др. // Вопросы кибернетики. Проблемы авиационной и космической кибернетики (интегрированные системы активного управления). — 1981. — С.138–151.
6. Замещение сложных радиолокационных объектов малоточечной моделью / Тырыкин С.В., Киселёв А.В., Савиных И.С.; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2002. – 23 с. – Депонирована в ВИНТИ 18.07.2002, № 1357 – В2002.
7. Имитация внешней электромагнитной среды и работы бортовых подсистем при полунатурных испытаниях сложных радиоэлектронных систем / Ахметов Д. Х., Ситников Ю. К. // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – 1988. – № 17. — С. 72–91.
8. United States Patent № 20090058715 «Methods and systems for generating virtual radar targets», 2009.

9. United States Patent № 6950057 «Complex radar target simulator», 2005.
10. United States Patent № 4467327 «Active millimeter wave simulator for missile seeker evaluations», 1984.
11. United States Patent № 5457463 «Radar return signal simulator», 1995.
12. United States Patent № 4660041 «Radar scene simulator», 1987.
13. Skolnik M.I. Radar Handbook. 3ed ed. – New York: McGraw Hill, 2008. – 1352 p.
14. Фельдман Ю. И., Гидаспов Ю. Б., Гомзин В. Н. Сопровождение движущихся целей. /Под ред. Ю. И. Фельдмана. — М.: Сов. радио, 1978.
15. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. — М.: Сов. радио, 1986.
16. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
17. Делано Р. Теория мерцания цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении. – Вопросы радиолокационной техники, 1954, №1, стр. 108–118.
18. Островитянов Р. В. К вопросу об угловом шуме. – Радиотехника и электроника, 1966, т. 11, №4, с. 592 – 601.
19. Губонин Н.С. Флюктуации фазового фронта волны, отраженной от сложной цели. – Радиотехника и электроника, 1965, т. 11, №5, с. 844–852.
20. Delano R., Pfeffer I. Effect of AGS on radar tracking noise. – Proc. IRE, 1956, v. 48, №6, p. 801–810.
21. Монаков А.А., Островитянов Р.В., Храмченко Г.К. Оценка положения энергетического центра протяженного объекта по зависимой выборке. -Радиотехника, №1,1998.

22. Островитянов Р.В., Монаков А.А. Статистические характеристики углового и дальномерного шумов при поляризационном усреднении. – Радиотехника и электроника, 1985, т.30, №12.

23. Островитянов Р.В., Монаков А.А. Угловой шум в многоканальных пеленгационных системах. - Радиотехника и электроника, 1988, т.33, №4.

24. Бакулев П.А., Джавадов Г.Г., Соколов Д.А. Шумы мерцаний в радиолокации. // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 1991. – №1. – с.3-10

25. 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.

26. Тырыкин С. В., Киселёв А. В. Экономичный алгоритм имитации сложных радиолокационных целей // Радиоэлектроника – 2003, №4. – С. 76–80 (Изв. высш. учеб. заведений).

27. Тырыкин С. В. Двумерная четырехточечная модель радиолокационного объекта // Труды Региональной научно-технической Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиотехники», Новосибирск, 26-30 ноября 2001г. – Новосибирск, НГТУ, 2001г., С. 28–31.

28. Тырыкин С. В. Модели радиолокационных объектов, содержащих большое количество блестящих точек // Тезисы докладов Седьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 27-28 февраля 2001г. – М., МЭИ, 2001, т. 1, С. 65–66.

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

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

31. Никулин А. В. Малоточечная модель протяженного отражающего объекта / А. В. Киселев, А.В. Никулин, С.В. Тырыкин// Доклады АН ВШ РФ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С.78-88.

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

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

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

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

36. Применение двухточечных моделей для моделирования эхосигналов сложных радиолокационных целей /Киселев А.В., Никулин

А.В.; Но-восиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2010. - 25 с. Библиогр.: 1 назв.
- Рус. - Деп. в ВИНТИ 21.07.10 № 467-В2010

37. Никулин А. В. Экспериментальная апробация возможностей дискретных моделей при имитации эхосигнала от подстилающей поверхности / А. В. Никулин; науч. рук. А. В. Киселев // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона"; Новосибирский государственный технический университет, - Новосибирск, 2011. - с. 463-467

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

39. M.W. Long, Radar Reflectivity of Land and Sea, 3rd Ed., Norwood, MA: Artech House, 2001.

40. D. Barrick and Q.Peake, A review of scattering from surfaces with different roughness scales, Radio Sci., vol. 3, pp. 865-868, 1968.

41. Джавадов Г. Г. Координаты целей и шумы мерцаний в радиолокации // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 2 международной научно-технической конференции, Владимир, 25–27 июня, 1997. – Гаврилов Посад, 1997. – С. 92–95.

42. 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.

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

44. Киселев А. В. Характеристики оценки координат точечной цели, визируемой на фоне распределенной пассивной помехи, моделируемой набором дискретных отражателей // Радиоэлектроника. — 1997. — № 10. — С. 55–59. (Изв. высш. учеб. заведений).

45. Колчинский В. Е., Мандуровский И. А., Константиновский М. И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. /Под ред. В. Е. Колчинского. — М.: Сов. радио, 1975. – 432с.

46. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовысотометрии. Под ред. А. П. Жуковского. – М.: Сов. радио, 1979. – 320 с.

47. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков, В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов; Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Сов. радио, 1983. – 272 с.

48. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др.; Под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.

49. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометиздат, 1973. – 343 с.

50. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. /Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

51. 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.

52. M.I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, 3rd Ed., New York: McGraw-Hill Book Company, 2001.

53. F.E. Nathanson, *Radar Design Principles*, 2nd Ed., New York: McGraw-Hill Book Company, 1991.
54. H. Goldslein, Frequency dependence of the properties of sea echo, *Phys. Rev.*, vol. 70, pp. 938-946. 1946.
55. A.H. Schooley. Some limiting cases of radar sea clutter noise, *Proc. IRE*, vol. 44, pp. 1043-1047, 1956.
56. W.S. Amenl, "Forward and backscattering by certain rough surfaces," *Trans. IRE*, vol. AP-4, pp. 369-373, 1956.
57. V. Twersky, On the scattering and reflection of electromagnetic waves by rough surfaces, *Trans. IRE*, vol. AP-5, pp. 81-90, 1957.
58. D.R. Lyzenga, A.L. Malfelt, and R.A. Schuchman, The contribution of wedge scattering to the radar cross section of the ocean surface, *IEEE Trans.* vol. GE-21, pp.502-505, 1983.
59. L.B. Wetzel, A minimalist approach to sea backscatter – the wedge model, in *URSI Open Symp. Wave Propagat.: Remote Sensing and Communication*, University of New Hampshire, Durham, preprint volume. July 28 - August 1, 1986, pp. 3.1.1—3.1.4.
60. S.O. Rice. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces, *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. 4, pp. 361-378, 1951.
61. W.H. Peake, Theory of radar return from terrain, in *IRE Nat. Conv. Rec.*, vol. 7, 1959, pp. 27-41.
62. G.R. Valenzuela, Depolarization of EM wave: by slightly rough surfaces," *IEEE Trans.*, vol. AP-15, pp. 552—559. 1967.
63. F.G. Bass and LM. Fuks, *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*, New York: Pergamon Press. 1979.
64. C. Eckart, The scattering of sound from the sea surface, *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 25, pp. 566—570. 1953.
65. P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, New York: Macmillan Company, 1963.

66. Варшавчик М.Л. О статистических характеристиках сигнала, рассеянного протяженным колеблющимся телом. – Радиотехника и электроника, 1968, т. 13, №10, с. 1749 – 1752
67. Варшавчик М.Л. К вопросу о взаимосвязи статистических амплитудных и фазовых характеристик сигналов, рассеянных протяженным телом. – Радиотехника и электроника, 1969, т. 14, №1, с. 84 – 90
68. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Корреляционная функция и выбросы углового шума. – Радиотехника и электроника, 1970, т. 15, №8, с. 1754 – 1756
69. Howard D. Radar target angular scintillation of aircraft. – IRE Trans., 1961, v. AP-9, №2, p. 173–181.
70. Muchmore R. Aircraft scintillation spectra. – IRE Trans., 1960, v. AP-8, №2, p. 201 – 212.
71. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.
72. Костенко Н.Л., Островитянов Р.В., Чаевский Е.В. Пространственная корреляция нормалей к фазовым фронтам. – Украинский физический журнал, 1971, т.16, №10, с. 1717–1721.
73. Антифеев В. Н., Борзов А. Б., Быстров Р. П., Соколов А. В. Анализ радиолокационных характеристик объектов сложной пространственной конфигурации // 5-я международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, Связь», Воронеж, 20–23 апр., 1999. Т.2.– Воронеж, 1999. – С. 1093–1098.
74. Борзов А. Б., Быстров Р. П., Соколов А. В., Сучков В. Б. Анализ эффективных поверхностей рассеяния объектов // Труды 7-ой Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Красновидово, Московская область, 24–30 мая, 1999. Т. 2. – Красновидово: 1999. – С. 170–172.

75. Андреев П. Г., Якимов А. Н. Математическое моделирование отражателя электромагнитных волн // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2000. – №4. – 63 с.
76. Дмитриенко А. Г., Корогодов С. В. Численный метод решения задач электромагнитного рассеяния на идеально проводящих телах в магнитодиэлектрической оболочке // Радиотехника и электроника. – 1998. – №12. С. 1463–1468.
77. Гандурин В. А., Милонов Г. А. Модель радиолокационного сигнала, отраженного от вертолета // Радиотехника. – 2001, №8. – С. 82–87.
78. Elizavetin I., Paillou P. The ground surface backscattering modeling using Integral Equation Model // European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, 25–27 May, 1998. Berlin: VDE, 1998, pp. 153–156.
79. Кутищев С. Н., Михайлов Г. Д., Преображенский А. П., Моделирование рассеяния электромагнитных волн на металлических полостях сложной формы круглого поперечного сечения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – №4. – С. 77–80.
80. Кутищев С. Н., Михайлов Г. Д. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на металлических полостях сложной формы прямоугольного поперечного сечения с радиопоглощающими покрытиями // 5-я международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, Связь», Воронеж, 20–23 апр., 1999. Т.2.– Воронеж, 1999. – С. 1103–1109.
81. Киселёва Ю. В., Кренёв А. Н. Формирование отражений от Земной поверхности методом математического моделирования // VII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, Навигация, Связь», Воронеж, 24–26 апр., 2001. Т.3. Воронеж: изд. ВГУ., 2001, С. 1538–1547.

82. Лучин А. А. Методы приближенного решения обратной задачи дифракции в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №8. С. 30–44.

83. Кравцов С. В., Лещенко С. П. Моделирование рассеяния электромагнитного поля на пропеллере аэродинамической цели // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – №4. – С. 39–44.

84. Борзов А. Б., Быстров Р. П., Соколов А. В. Сучков В. Б. Объектно-ориентированная модель полей рассеяния сложных радиолокационных сцен // Труды 7-ой Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Красновидово, Московская область, 24–30 мая, 1999. Т. 2. – Красновидово: 1999. – С. 169–170.

85. 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.

86. 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), Новосибирск, Ноябрь, 1994г.– т.7. – С. 31–33.

87. Козлов И. М. Параметры двухточечной статистической модели для имитации сложного радиолокационного объекта // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – № 5–6. – С. 19–23.

88. Степанов М.А. Алгоритмы расчета амплитуд сигналов трехточечного матричного имитатора для установки заданного положения кажущегося центра излучения / М. А. Степанов, И. Ю. Калмыков, А. В. Киселев // Вопросы радиоэлектроники. Серия Радиолокационная техника (РЛТ). - 2014. - Вып. 2. - С. 57-68.

89. Степанов М.А. Возможности позиционирования кажущегося центра излучения в трехточечном матричном имитаторе / М. А. Степанов, И.

Ю. Калмыков, В. В. Дуркин // Вопросы радиоэлектроники. Серия Радиолокационная техника (РЛТ). - 2014. - Вып. 2. - С. 69-76.

90. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

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

92. Blake L. V., Heath D. C. Radar Range Performance Analysis. – Boston-London, Artech House, 1980.

93. Minguzzi B., Neri P. Synthesis from experimental data of a mathematical model of clutter. – Riv. Tech. Selenia, 1973, v. 1, №2, pp.1-18, №4, pp.1-12.

94. Henn J. W., Pictor D. H., Webb A. Land clutter study: low grazing angles (backscattering). – IEEE Int. Radar. Conf., Arlington, 1982, pp. 380-384.

95. Barton D. K., Leonov S.A. (eds.). Radar Technology Encyclopedia, Boston-London: Artech House, 1998.

96. Kulemin G. P. Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter. – Boston-London: Artech House, 2003.

97. Savchenko, A. K., S. J. Haimov, and G. P. Kulemin. On the Experimental Study of Radar Backscattering from Land, XVII Europ. Microwave Conf., Stockholm, October 1988, pp. 705—709.

98. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 464 с.

99. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / Под ред. В. Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.

100. Аристов В. И., Рожков М. М., Архипец Г. А., Киселев А. В. Экономичный алгоритм расчета доплеровского спектра эхо-сигнала от подстилающей поверхности. // Сб. трудов Гос. НИИАС. — 1992. — вып.1 (300). — С.43–48.

101. Важенин И.А., Гусачев М.С., Карманов Д.В. Технология преобразования карт формата SXF для хранения в базе пространственных данных ARCGIS. Информация и космос, 2013, №1, 26-29

102. Официальный сайт ЗАО КБ «Панорама». Цифровые карты и снимки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gisinfo.ru/price/price_map.htm

103. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. / под ред. А. И. Канащенкова, В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.

104. Шепель В.Н. Алгоритм определения эмпирической функции плотности по выборке из генеральной совокупности / В.Н. Шепель // Современные информационные технологии в науке и практике. Материалы VIII всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ. – 2009. – С. 224–226.

105. Шепель В.Н. Модернизация метода гистограмм для выявления принадлежности неизвестного массива данных определенному закону распределения вероятностей/ Шепель В.Н., Акимов С.С. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 9, сентябрь. – С. 179–181.

106. Шепель В.Н. Процедура построения выборочного аналога функции плотности/ Шепель В.Н // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 2, февраль. – С. 320–322.

107. Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений /Э.И. Цветков. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение. – 1979. – 288 с.

108. Артюшенко В. В. Использование графических процессов для имитации радиолокационных эхосигналов от поверхности Земли / В. В. Артюшенко, А. В. Киселев, С. В. Тырыкин // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 4. – С. 37-39.

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

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

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

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

113. Артюшенко В.В. Математическое моделирование статистических характеристик шумов координат геометрической модели распределенного объекта / Материалы докладов XI международной научно-практической

конференции «Электронные средства и системы управления», 25-27 ноября 2015 г., Томск: в 2-х частях. – Томск: В-Спектр, 2015. – Часть 1. – С. 13-17.

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

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

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

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

118. Герасимов А.Б. Имитация радиосигналов, рассеянных сложными радиофизическими сценами, в реальном масштабе времени: автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Владимир, 2011. 24 с.

119. Артюшенко В. В. Условия инвариантности параметров шумов координат геометрической модели к углу визирования / Сборник научных трудов XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», 19-21 апреля 2017 г., Новосибирск: в 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Том 2. – С. 234-238.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акт о внедрении научных результатов

Утверждаю

Генеральный директор

АО «НПО НИИИП – НЗиК»

П. В. Заболотный

«10»

2017 г.



Утверждаю

Проректор НГТУ по научной

работе, профессор

А. Г. Вострецов

04 2017 г.



АКТ

о внедрении научных результатов

диссертационной работы В. В. Артюшенко

Мы, представители АО «НПО НИИИП – НЗиК» в лице генерального директора П. В. Заболотного, главного конструктора А. Г. Ларина, начальника тематического сектора, к. т. н. С. Я. Прудникова и представители Новосибирского государственного технического университета в лице проректора А. Г. Вострецова, зав. кафедрой РПиРПУ, профессора А. В. Киселева составили настоящий акт об использовании научных результатов диссертационной работы В. В. Артюшенко.

Использование результатов диссертационной работы В. В. Артюшенко происходило в рамках договора РТУ-1-16 между АО «НПО НИИИП – НЗиК» и НГТУ.

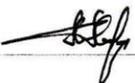
В. В. Артюшенко выполнено теоретическое обоснование применимости дискретных геометрических моделей поверхностно-распределенных объектов для синтеза имитаторов эхосигналов и помех. На их основе разработано программное обеспечение имитатора эхосигналов и помех, используемого в составе тренажера радиотехнической системы.

От АО «НПО НИИИП – НЗиК»:

От НГТУ:

Главный конструктор

Зав. кафедрой РПиРПУ, профессор


 А. Г. Ларин


 А. В. Киселев

Начальник тематического отдела, к. т. н.


 С. Я. Прудников