

УДК: 621.396.967.001.57

## **Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования**

Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А.В., Шевела И.А., Юсупов Р.Г.

### **Аннотация**

Рассматриваются вопросы и примеры математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) с использованием двух моделей. Имитационная модель РСА предназначена для отработки алгоритмов пространственно-временной обработки и формирования радиолокационного изображения (РЛИ). Комплекс смешанного моделирования предназначен для имитации, в том числе и в реальном масштабе времени, РЛИ, соответствующих РЛИ, полученных при реальных работах РСА, и используется для отработки алгоритмов обнаружения и распознавания и взаимодействия РСА со смежными системами.

### **Ключевые слова**

радиолокатор; синтезированная апертура; моделирование; согласованная обработка; радиолокационные изображения; имитация.

## **Введение**

Комплекс математического моделирования радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) предназначен для модельного сопровождения РСА на всех этапах их жизненного цикла при автономной работе или в составе сложной системы. При этом должны отрабатываться задачи как внутреннего проектирования РСА, связанные с решением вопросов его оптимизации, так и внешнего проектирования, обеспечивающие оптимизацию

алгоритмов обработки информации на выходе РСА и вопросы взаимодействия РСА с другими составными частями этой системы.

Сложность моделирования РСА по сравнению с моделированием, например, обзорных РЛС или РЛС сопровождения определяется многими факторами. Это связано и со сложностью имитации отражений от местности и протяженных объектов и с формированием огромного потока радиолокационной информации с приемных устройств РСА (радиоголограмм - РГ). Это и пространственно-временная обработка РГ при согласованной с зондирующим сигналом фильтрации и при формировании радиолокационных изображений (РЛИ). Например, в РСА, использующем зондирующий сигнал с полосой порядка 200 МГц поток РГ с учетом двух приемных каналов (например, для сигналов разной поляризации) и формирования двух квадратурных составляющих достигает 50...100 МБ/с. Даже современные мощные ЭВМ, устанавливаемые на борту крупных летательных аппаратов (ЛА) и использующие дополнительные быстродействующие сигнальные сопроцессоры, не могут обеспечить решение этих задач в реальном времени. А помимо формирования РЛИ требуется еще решить задачи обнаружения и распознавания протяженных объектов на фоне отражений от местности, что на порядки увеличивает объем требуемых вычислений по сравнению с обычно решаемой задачей обнаружения одиночной точечной цели.

Поэтому в современных РСА, использующих даже специализированные вычислительные системы, как правило, в реальном масштабе времени осуществляют внутриимпульсную обработку, согласованную с зондирующим сигналом, и формируют обзорное РЛИ с худшим разрешением по сравнению с потенциально возможным, если исходить из параметров лоцирования. Затем, по обзорному РЛИ определяют интересующие точки этого обзорного РЛИ и с некоторой задержкой формируют соответствующие фрагменты детальных РЛИ. Но и при этом для оперативной обработки используются упрощенные алгоритмы, например не проводится самофокусировка, что значительно снижает качество РЛИ. Основная обработка по формированию детальных РЛИ с максимально возможным качеством проводится по записанным в память РГ в нереальном масштабе времени (на земле).

Если учесть хотя бы только перечисленные факторы, то становится понятным, что моделирование таких систем, как РСА, требует разработки специальной структуры и технологии моделирования.

Исходя из задач моделирования и обеспечения его адекватности реальным процессам с точки зрения получения конечных для каждой задачи результатов, исходя из различия

временного масштаба моделирования, что, в частности, связано с участием в моделировании операторов РСА и смежных систем, было проведено разделение всех задач, решаемых при моделировании РСА, на две группы. В соответствии с этим созданы две модели: математическая имитационная модель (ИМ) РСА и комплекс смешанного моделирования (КСМ) РСА.

ИМ РСА предназначена для решения вопросов, связанных с качеством формирования РЛИ. В ней осуществляется подробная имитация алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов в РСА и формирования РЛИ при ограниченном объеме имитируемых отражателей. Моделирование осуществляется в нереальном масштабе времени. Используются оптимальные и упрощенные алгоритмы обработки сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и формирования РЛИ с учетом искажений этих сигналов в тракте, ошибок навигационной системы и пр.

КСМ РСА обеспечивает имитацию РЛИ на выходах многоканального многочастотного РСА и интерфейса его операторов, в том числе, для работы в реальном времени. КСМ предназначен для отработки методов и алгоритмов обнаружения и распознавания и оценки их эффективности, а также для моделирования РСА при его работе в составе сложных систем. Для обеспечения работы КСМ в реальном времени до начала каждого сеанса моделирования осуществляется предварительный расчет исходных детальных РЛИ, на базе которых при моделировании формируются требуемые РЛИ. При имитации исходных РЛИ используются статистические методы, а для обеспечения адекватности имитируемых РЛИ реальным используются результаты статистической обработки РЛИ, полученных во время реальных работ РСА в аналогичных условиях.

К этим двум моделям примыкают полунатурное и физическое моделирование, позволяющие, с одной стороны, проверить и отработать создаваемые системы, а с другой стороны, проверить их работу в условиях, приближенных к реальным. Смешанное моделирование содержит в себе элементы полунатурного моделирования (ПНМ), так как предполагает задействование в процессе моделирования операторов РСА и смежных систем с имитацией реального интерфейса, используемого операторами при их работе. При этом КСМ обеспечивает сочетание преимуществ и возможностей математического и полунатурного моделирования. В частности, переход от ПНМ к КСМ, при котором широко используется представление смежных систем их математическими моделями, например, на основе их статистических эквивалентов, позволяет моделировать разнообразные ситуации, в том числе и те, которые практически по тем или иным причинам невозможно реализовать

при ПНМ. Вместе с тем, использование в КСМ операторов позволяет избежать ряда алгоритмических и программных трудностей математического моделирования и более адекватно отражать действия операторов.

## **1. Имитационная модель**

### **1.1. Задачи имитационной модели**

Область возможного применения ИМ РСА очень широка. В частности, можно отметить следующие задачи, решаемые с помощью ИМ:

- отработка и повышение эффективности алгоритмов фильтрации сигналов и формирования РЛИ, отработка методов и алгоритмов самофокусировки и других алгоритмов, направленных на улучшения качества РЛИ,
- анализ возможности упрощения алгоритмов обработки сигналов и формирования РЛИ при допустимом уровне снижения качества РЛИ и его искажений,
- отработка методов повышения точности оценки местоположения объектов,
- определение требований к системам навигации, используемых в РСА при синтезировании антенны и формировании РЛИ, исходя:
  - из повышения качества формируемых РЛИ,
  - из обеспечения требуемой точности определения местоположения объектов,
- отработка РСА со сверхширокополосными зондирующими сигналами, методов и алгоритмов учета искажений этих сигналов в трактах и пр.

Принципиально ИМ можно использовать и при отработке алгоритмов обнаружения и распознавания. Однако это связано не только с трудностями имитации отражений от отдельных объектов и, особенно, от фона, но с тем, что решение таких задач потребует слишком большого, как правило, неприемлемого для практики времени моделирования.

### **1.2. Практическая реализация ИМ**

Несмотря на то, что моделирование в ИМ изначально предполагалось осуществлять в нереальном масштабе времени, тем не менее, в этой модели очень остро стоит вопрос о необходимости существенного сокращения времени моделирования. Это, в частности, связано с тем, что в настоящее время все большее применение находят РСА с широкополосными зондирующими сигналами большой длительности. Как правило, используются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и с большим коэффициентом сжатия  $K_{сж} = \tau_i \times f_{дев}$ , где  $\tau_i$  – длительность зондирующего сигнала, а  $f_{дев}$  – девиация частоты в импульсе. Например, уже достаточно широко используются ЛЧМ сигналы с  $f_{дев}$  порядка 500 МГц при  $\tau_i$  порядка 30 мкс. В этом случае  $K_{сж} = 15000$ . В

перспективе предполагается использование сверхширокополосного сигнала (см., например, [1,2]) с  $K_{сж}$  до  $10^7$  и более. Но уже при широкополосном сигнале вычислительные затраты, связанные с согласованной обработкой такого сигнала, очень велики, и для достижения приемлемых для практики времен моделирования требуется на порядки снизить эти затраты.

Для радикального сокращения (на порядки) затрат на моделирование обработки входной информации, согласованной с зондирующим импульсом, можно воспользоваться корреляционно-фильтровой обработкой (см., [3,4]). При наличии нескольких приемных каналов обработка проводится в каждом канале. На первом этапе входной сигнал, представляющий собой всю сумму отраженных сигналов на  $k$ -ый такт зондирования, умножается в квадратурах на опорный ЛЧМ сигнал – сигнал гетеродина (см. рис. 1), положение которого согласовывается со взаимным положением лоцируемой зоны и антенны приемника. Выход умножителя каждого  $l$ -го приемника фильтруется, так что на выходе умножителя остается только составляющие разностной частоты  $\Delta f_{разн\ lmk}(t)$  для каждого  $m$ -го принятого сигнала и сигнала гетеродина с учетом их перекрытия по времени. Эти сигналы оцифровываются.

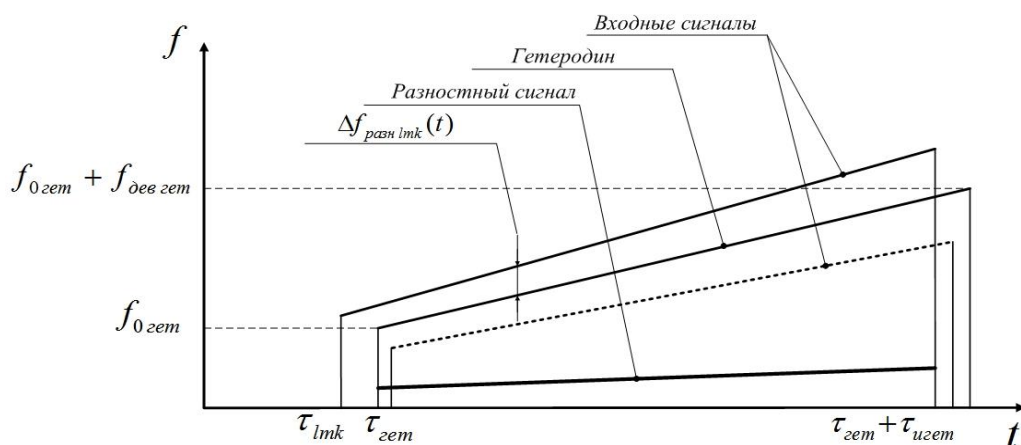


Рис. 1

Операции умножения и фильтрации не представляют трудности для аналитического описания, но в этом случае выходом умножителя и, соответственно, входным сигналом модели является сигнал, полоса которого на порядки меньше полосы зондирующего ЛЧМ сигнала, что приводит к резкому упрощению реализации на ЭВМ второй части согласованной обработки входной информации – фильтрации результата перемножения. На этом втором этапе обработки цифровая согласованная фильтрация должна осуществляться для разностного сигнала каждого отражателя, что при формировании РЛИ означает – для каждого элемента на местности с шагом расчета РЛИ. Но так как полосы этих сигналов

невелики, то двухэтапная обработка позволяет на порядки сократить время на моделирование согласованной обработки в импульсе.

Третий этап обработки - межпериодная траекторная обработка [5] и формирование РЛИ. Существуют разные методы ее реализации. Наиболее полно и корректно отражает существо процесса алгоритм обработки траекторного сигнала способом прямой свертки. Алгоритм прямой свертки для рассматриваемого случая корреляционно-фильтровой обработки подробно изложен в [4] и [6]. Два других широко известных способа – способ быстрой свертки и гармонического анализа [5] – хотя и требуют значительно меньших вычислительных затрат, но дают определенные погрешности, что может оказаться недопустимым из-за ухудшения качества получаемых РЛИ. Вместе с тем, имеются возможности упрощения алгоритма траекторной обработки методом прямой свертки при контролируемом качестве РЛИ. В работе [4] показано, что при допустимости некоторых искажений РЛИ объем вычислений при их формировании за счет использования упрощенных алгоритмов может быть снижен в десятки раз. Это сопоставимо с уменьшением требуемого быстродействия при переходе от согласованной обработки РГ методом прямой свертки к способам быстрой свертки и гармонического анализа (см., [5], стр. 194). Но, вместе с тем, использование в модели алгоритма прямой свертки с его управляемым упрощением позволяет оператору выбирать в зависимости от решаемой задачи и вычислительных ресурсов между качеством РЛИ и временными затратами на их формирование. В разработанной ИМ предусмотрено введение упрощенной свертки, причем параметры упрощения могут рассчитываться как автоматически (при заложенных в программе искажениях РЛИ), так и вводиться вручную. Однако при необходимости в ИМ можно перейти от прямой свертки к двум другим указанным способам межпериодной обработки.

Алгоритм корреляционно-фильтрового способа с одним опорным сигналом может быть применен при формировании РЛИ участка дальности, протяженность которого значительно меньше величины  $c/\tau_n$ , где  $c$  – скорость света. Только в этом случае происходит почти полное перекрытие по времени одним опорным сигналом всех отраженных сигналов лоцируемого участка. При применении простых импульсов или ЛЧМ импульсов с малым коэффициентом сжатия необходим переход к прямой фильтрации, что достигается использованием в модели на 1-м этапе обработки простого сигнала гетеродина без ЛЧМ.

Принятая структура построения ИМ позволяет реализовывать еще два этапа обработки, встречающиеся на практике. 4-ый этап связан с наличием в РСА нескольких

приемников и с обработкой результатов синтезирования РЛИ в разных приемных модулях, например, в интересах СДЦ или оценки рельефа местности.

5 этап связан с возможностью формирования нескольких приемных лучей по выходу одного приемного модуля, что может потребоваться при имитации формирования нескольких лучей и их некогерентного суммирования.

Для иллюстрации работы ИМ и вида получаемого РЛИ при работе РСА в режиме бокового обзора на рис. 2 и 3 приведены РЛИ для одиночного точечного отражателя при девиации в импульсе  $f_{\text{дев}} = 500$  МГц, несущей частоте  $f_0 = 10$  ГГц, скорости носителя РСА  $V = 100$  м/с, дальности до отражателя на траверзе  $R_0 = 30$  км и протяженности синтезированной апертуры  $D_{\text{синт}} = 1$  км. На рис.2 показано 3-х мерное РЛИ в линейном масштабе, а на рис. 3 – в логарифмическом масштабе.

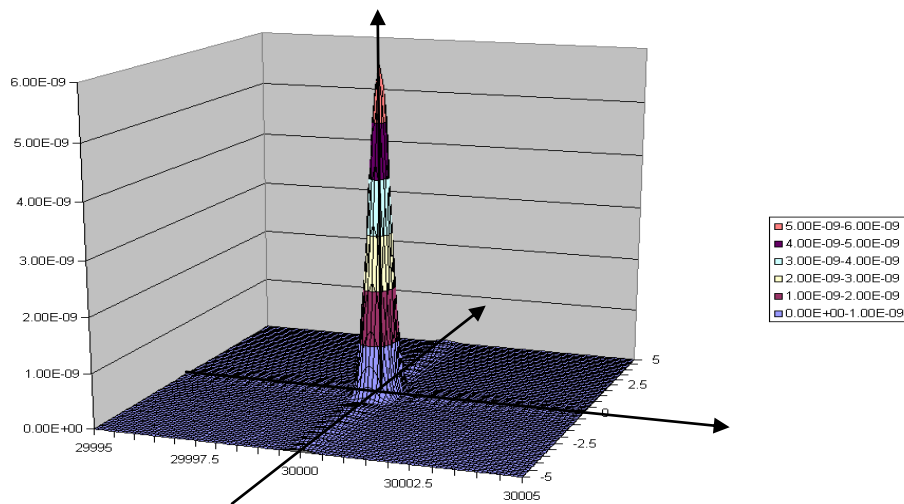


Рис. 2

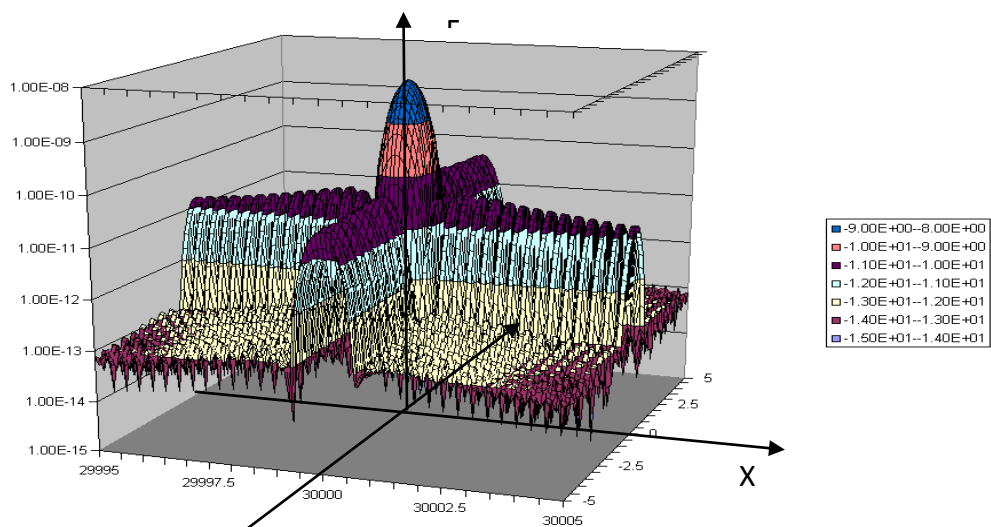


Рис. 3

### 1.3. Примеры применения ИМ

Исходя из задач и возможностей предложенной ИМ, можно привести примеры ее применения.

Оптимизация алгоритмов обработки сигналов и формирования РЛИ можно рассмотреть на примере работы алгоритмов самофокусировки. Интерфейс ИМ позволяет задать ошибки навигационной системы (НС) в виде детерминированных, случайных коррелированных или независимых ошибок по любой оси относительно направления полета носителя. На рис.4 приведен отклик РСА на одиночный отражатель (РЛИ) при  $f_{\text{дев}}=500$  МГц,  $f_0=10$  ГГц,  $V=100$  м/с,  $R_0=30$  км,  $D_{\text{синт}}=1$  км и при дисперсии ошибок навигации в поперечном направлении равной  $0.01 \text{ м}^2$ . Видно, что в отсутствие самофокусировки происходит «развал» главного лепестка отклика, показанного на рис. 3.

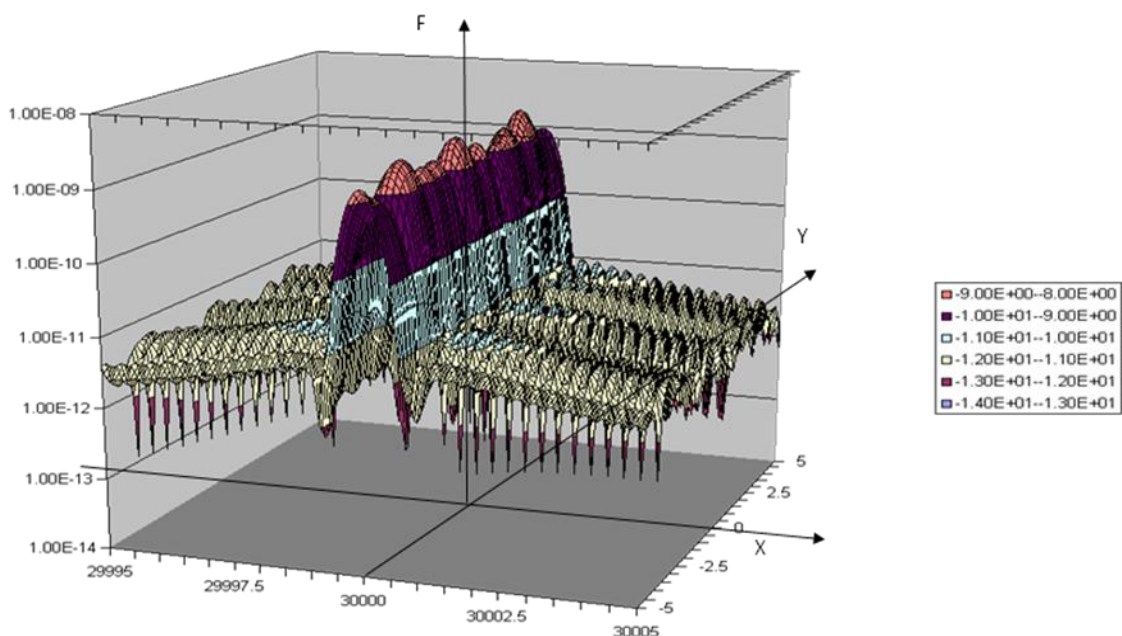


Рис. 4

Ввод одного из возможных алгоритмов самофокусировки приводит к значительному улучшению формы отклика (см. рис. 5), но все же сохраняется высокий уровень ближних боковых лепестков.

При анализе ошибок в определении положения отражателя определяются две составляющие этой ошибки (связанные с НС): ошибка в определении истинного положения носителя (его траектории) и ошибка в определении положения на РЛИ максимума отклика на этот отражатель.



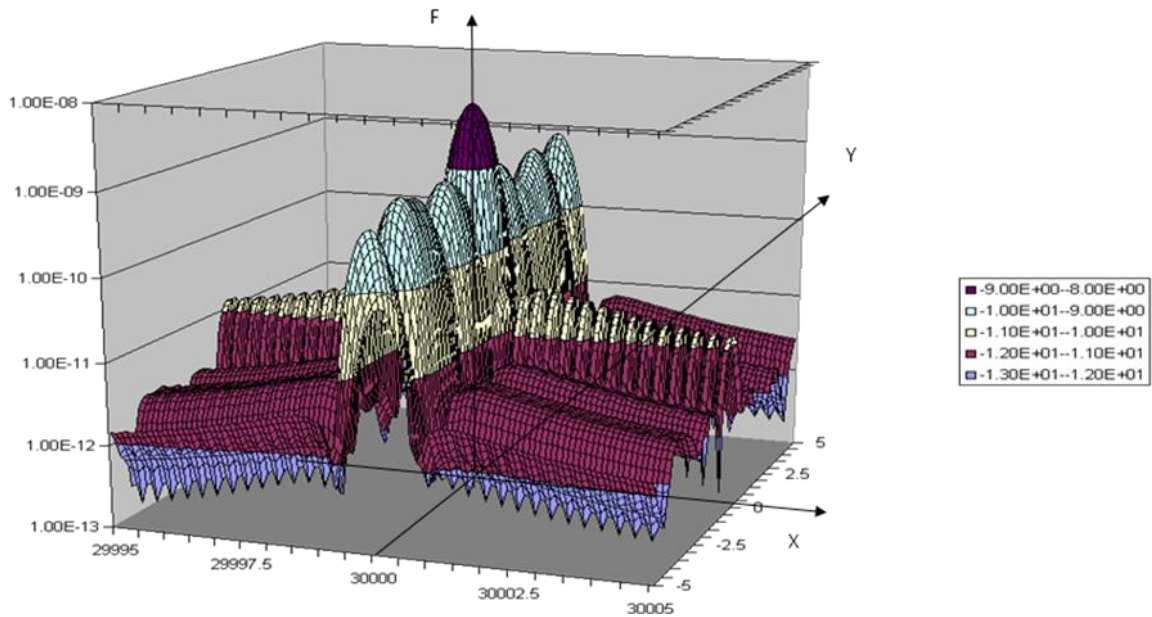


Рис. 5

Можно также привести пример моделирования взаимовлияния в РСА разрешения по двум осям, что заметно при значительном различии этих разрешений. На рис. 6 приведены два отклика при  $f_0 = 10$  ГГц,  $D_{\text{синт}} = 2$  км,  $R = 4$  км и при  $f_{\text{дев}} = 10$  ГГц (рис. 6а) или 10 МГц (рис. 6б) при работе РСА в телескопическом режиме.

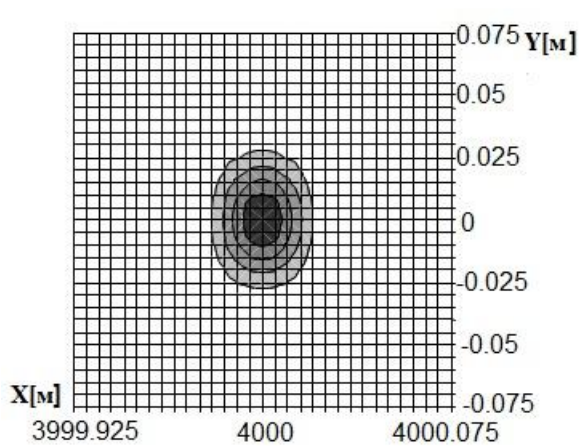


Рис. 6а

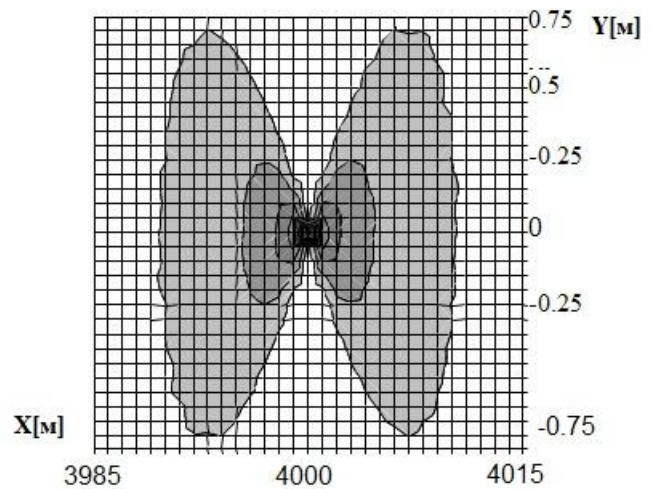


Рис. 6б

В рассматриваемом примере при  $f_{\text{дев}} = 10$  ГГц теоретическая оценка разрешающей способности по обеим координатам составляет 3 см, что и подтверждают результаты моделирования. При  $f_{\text{дев}} = 10$  МГц разрешающая способность по дальности упала до 15 м, что привело к появлению «бабочки» [7].

Как уже отмечалось, ИМ изначально предназначена для моделирования перспективных РСА со сверхширокополосным сигналом большой длительности (СШС БД). Но при использовании СШС БД вследствие его широкополосности неизбежны искажения сигнала в тракте прохождения (распространения) этого сигнала. В интерфейсе модели предусматривается ввод этих искажений и вариантов учета этих искажений при обработке.

Характерной особенностью СШС БД является «размывание» дифракционных лепестков (ДЛ), что позволяет использовать и реальные, и синтезированные прореженные малоэлементные антенные решетки. Это дает существенные дополнительные возможности, например, при создании многофункциональной РЛС (см., например, [8]). ИМ позволяет оценить уровень ДЛ при применении СШС БД. Для примера на рис. 7 показано РЛИ одиночного отражателя при синтезированной решетке протяженностью  $D_{\text{синт}} = 2$  км с шагом 2 м,  $f_0 = 10$  ГГц,  $f_{\text{дев}} = 10$  ГГц,  $V=200$  м/с и дальности до отражателя на траверсе  $X_0 = 20$  км [7]. Как видно из рис. 7 уже первый ДЛ на 60 дБ меньше главного лепестка отклика.

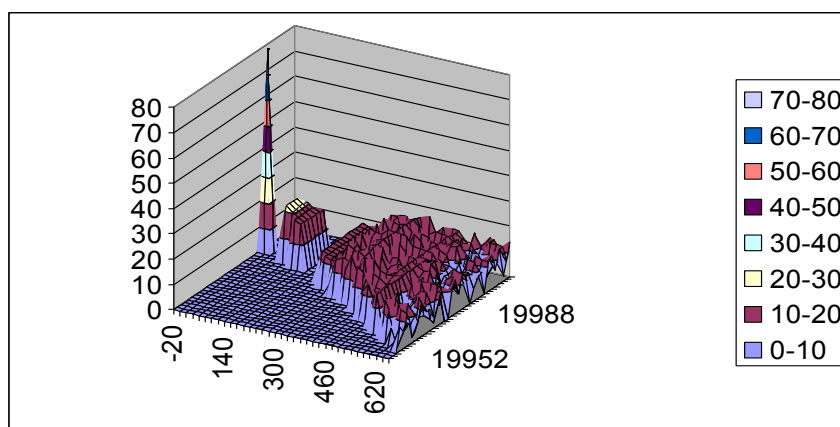


Рис. 7

## 2. Комплекс смешанного моделирования РСА

### 2.1. Структура КСМ

Структура КСМ для многочастотного многоканального РСА при его автономном моделировании и в составе более сложной системы может быть представлено рис. 8. На рис. 8 показаны два, например, частотных канала РСА, каждый со своим оператором. При этом количество мониторов может быть различным. Например, их может быть два в каждом канале: на одном мониторе отображается обзорное РЛИ, формируемое в этом канале, а на другом отображаются фрагменты детальных РЛИ, выбранные оператором этого канала по его обзорному РЛИ или по данным с другого канала. Предполагается, что взаимодействие двух (и более) каналов РСА, как и взаимодействие его с другими смежными система (на

рисунке показан для примера пассивный локатор) осуществляется с помощью локальной вычислительной системы (ЛВС). Общее руководство моделированием: задание состава модели, исходных данных (ИД) на все системы, управление процессом моделирования осуществляется диспетчером модели. В общем случае их может быть два: при автономном моделировании РСА работает диспетчер этой модели. Задание ИД, процесс моделирования, формируемые команды и сигналы взаимодействия отображаются и контролируются с помощью системы визуализации этого процесса. На этом рисунке показана модель комплексной обработки (с возможным подключением оператора) и база данных, предназначенная в основном для хранения и систематизации полученных и сформированных на моделях РГ, РЛИ и программного обеспечения.

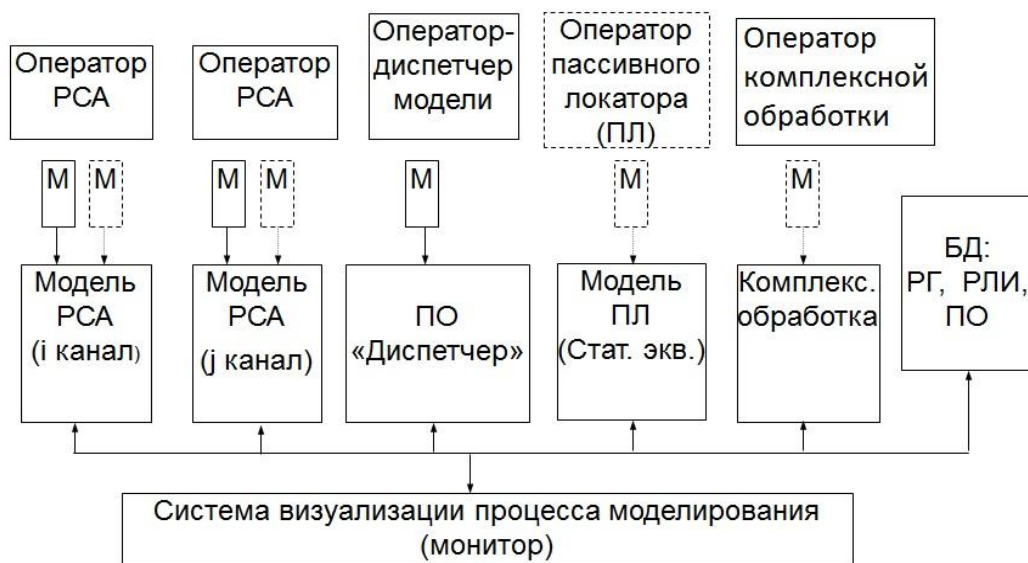


Рис. 8

## 2.2. Основные задачи КСМ

Основными задачами КСМ являются:

- Обработка задач, в том числе, и оперативного обнаружения и распознавания с использованием операторов и различных алгоритмов автоматизации.
- Оценка эффективности алгоритмов обнаружения и распознавания для стандартных ситуаций и в конкретных условиях, полученных при реальных работах РСА.
- Обработка алгоритмов и протоколов взаимодействия разных каналов РСА.
- Обработка взаимодействия РСА со смежными системами.
- Обработка групповых действий.

При этом выделяются две группы задач. Одна группа - частные задачи моделирования многоканального многочастотного РСА, связанные с обнаружением и распознаванием

малоразмерных объектов, а также с оценкой их местоположения на РЛИ. Отрабатываются построение РСА и действия его операторов, алгоритмы автоматизации и автоматического оперативного решения этих задач с оценкой эффективности предлагаемых методов и алгоритмов.

Вторая группа задач связана с проведением «сквозного» моделирования с целью отработки задач, методов и алгоритмов работы РСА в составе более сложных систем.

### **2.3. Особенности моделирования на КСМ**

Решение задач оперативного обнаружения и распознавания, так же как и отработка взаимодействия каналов РСА и их операторов между собой и с другими системами при «сквозном» моделировании требуют, как правило, моделирования работы РСА в реальном или в близком к реальному масштабе времени. При этом должен быть смоделирован интерфейс операторов РСА и поток данных с выхода РСА. Причем формируемые при этом РЛИ должны быть достаточно адекватны реальным РЛИ, чтобы можно было отрабатывать алгоритмы обнаружения и распознавания, определять их параметры и оценивать их эффективность.

Как уже отмечалось ранее, формирование РЛИ, исходя из РГ, в реальном времени в настоящее время не представляется возможным. Единственно возможный путь – использование готовых РЛИ, полученных при реальных работах РСА или путем математического моделирования. Но для отработки алгоритмов и оценки их эффективности необходима имитация различных условий, при которых они применяются, как по фону, так и по обнаруживаемым объектам, а также требуются точные статистические данные об этих условиях. Это практически невозможно выполнить при работе по РЛИ, полученным при реальных полетах. Поэтому для имитации РЛИ статистически однородных поверхностей используется математическое моделирование. При этом в имитируемых РЛИ должны быть учтены характерные особенности РЛИ от разной местности, явление спекла и пространственная корреляция, связанные с разрешением РСА, а также пространственная корреляция интенсивности отражений (дисперсии РЛИ) в зависимости от типа и параметров поверхности.

Таким образом, в КСМ должно быть обеспечено:

- Моделирование в реальном времени.
- Использование стохастических РЛИ.

- Адекватность статистических характеристик формируемого РЛИ статистическим характеристикам реального РЛИ, соответствующего рассматриваемому режиму работы исследуемого РСА при лоцировании им задаваемого участка местности.
- Предварительный расчет до начала моделирования исходных детальных (а в некоторых случаях и обзорных) РЛИ с заданными статистическими характеристиками.
- Формирование в процессе моделирования на базе исходных детальных РЛИ текущих РЛИ с требуемыми в соответствии с этапом моделирования параметрами.

Дополнительно следует отметить целесообразность использования для набора статистических данных при оценке характеристик обнаружении и распознавании статистически однородных имитируемых РЛИ.

В модели в целях формирования РЛИ статистически однородной поверхности для каждого частотного диапазона формируются два исходных массива размером  $N_R \times N_\alpha$  – массивы комплексных нормальных случайных независимых величин с единичной дисперсией и нулевыми средними. Полагается, что число элементов по дальности  $N_R$  и по азимуту  $N_\alpha$ , разное для разных каналов. Это число соответствует задаваемой максимально возможной для данного диапазона ширине зоны формирования РЛИ при минимально возможном в этом диапазоне шаге формирования РЛИ (соответственно, по дальности и азимуту). На практике по дальности это соответствует, в общем случае, шагу АЦП на выходе приемного устройства РСА каждого канала. По азимуту этот шаг выбирается разработчиками достаточно произвольно, но по умолчанию можно принять, что этот шаг соответствует шагу по дальности. В некоторых случаях возможно сокращение  $N_R$  и/или  $N_\alpha$  при допустимости повторения участков поверхности за счет их стыковки.

Далее на основе рассчитанных массивов формируются шаблоны конкретных поверхностей (лес, поле, пашня, ВПП и пр.), их квадратурные составляющие. Эти шаблоны поверхностей во всех диапазонах имеют одинаковую пространственную корреляцию их интенсивности, связанную, например, с изменением растительного покрова или неровностями поверхности. Для ввода этих изменений интенсивности можно воспользоваться разными методами. Один метод связан с непосредственным вычислением изменения дисперсии шаблона по двум координатам в соответствии с задаваемыми глубиной изменения этой интенсивности и интервалом корреляции. Закон изменения дисперсии по пространству (по местности) может быть получен, например, за счет фильтрации случайных независимых выборок.

Исходя из выбранного для подготавливаемого сеанса моделирования для конкретного канала минимального шага моделирования и параметров моделируемой поверхности (удельной ЭПР), для каждого канала формируются квадратурные составляющие – исходные модели РЛИ участков поверхности (ИМП), моделируемых в данном сеансе. Элементы этих ИМП (выборки) представляют собой независимые случайные величины с заданным (минимально возможным при данном сеансе моделирования) шагом, со средней мощностью (ЭПР одной выборки), соответствующей выбранной поверхности, и с выбранным ранее изменением этой мощности (интенсивности).

Очень важным фактором является закон распределения яркости РЛИ. При использовании в квадратурах нормального распределения распределение яркости РЛИ будет релейским. Как показывает анализ и из литературных данных [5] распределение яркости РЛИ может значительно отличаться от релейского. Для получения распределения близкого к реальному сначала проводится анализ реально полученных РЛИ. Затем в одну из квадратур вводят поправку в виде дополнительного слагаемого. В качестве статистических «добавок», корректирующих распределение яркости РЛИ, могут быть использованы случайные величины, имеющие, например, логнормальное распределение или распределение Эрланга. Однако подробное изложение этого вопроса выходит за рамки данной работы.

При формировании РЛИ объектов для всех диапазонов используются одни и те же геометрические размеры, но число отсчетов определяется шагами, принятыми при формировании шаблона РЛИ данного канала. Ориентация объекта на плоскости задается диспетчером модели. При необходимости можно ввести программу для случайного выбора этой ориентации. На первых этапах разработки модели распределение ЭПР объекта на данном этапе задается детерминированным алгоритмом. На последующих этапах могут быть разработаны специальные алгоритмы формирования распределения ЭПР в пределах каждого объекта. На основании принятых алгоритмов формируются исходные модели квадратурных составляющих РЛИ объектов (ИМО).

Для формирования исходных моделей РЛИ поверхности и объектов (ИМПО) квадратурные составляющие ИМП и ИМО суммируют. При этом для открытых поверхностей типа луг, не оказывающих маскирующее действие на объекты, участки поверхности, занятые объектом, обнуляются. При наличии маскирующего эффекта это учитывается при вводе ИМО.

Для каждого сеанса моделирования диспетчер модели заранее или оператор канала РСА в процессе моделирования выбирают разрешение и шаг формирования текущего РЛИ.

Естественно, при этом разрешение не может быть больше, а шаг не может быть меньше выбранных ранее при формировании ИМПО значений разрешения и минимального шага. Эти РЛИ формируются, исходя из ИМПО, путем:

- скользящего суммирования выборок ИМПО (в квадратурах) в соответствии с соотношением шагов в ИМПО и разрешений для каждого канала, и их прореживания, при необходимости, для получения РЛИ в соответствии с выбранным шагом формирования детальных РЛИ,

- нахождения огибающей (интенсивности) полученных выборок – это модель детального РЛИ,

- формирования обзорных РЛИ за счет:

- суммирования выборок огибающих детального РЛИ в соответствии с соотношением разрешений детальных и обзорных РЛИ,

- или скользящего суммирования выборок детальных РЛИ и их прореживания, при необходимости, для получения РЛИ в соответствии с выбранным разрешением РСА и шагом формирования РЛИ.

Формирование ИМПО, а иногда и текущих РЛИ является подготовительным этапом и должен быть осуществлен до начала моделирования. Только по завершении расчетов по этим пунктам можно приступить непосредственно к имитационному моделированию.

Момент расчета текущих РЛИ зависит от решаемой задачи. При решении частных задач, связанных, например, с обнаружением и распознаванием, когда все параметры формируемого РЛИ определены до начала процесса имитационного моделирования, их расчеты проводятся на подготовительном этапе.

При «сквозном» моделировании параметры формируемого РЛИ уточняются по результатам работы в процессе моделирования смежных систем, например, пассивного локатора (ПЛ), который определяет с той или иной точностью положение источника радиоизлучения (ИРИ). Данные от ПЛ могут уточнять параметры формируемого РЛИ участка, связанного с ИРИ. Поэтому на подготовительном этапе формируется ИМПО этого участка, а по результатам работы ПЛ определяются параметры текущего РЛИ. Если время, необходимое для расчета текущего РЛИ, велико, то в модели предусматривается введение паузы в процессе моделирования, необходимой для расчета этого текущего РЛИ.

С целью сокращения вычислительных затрат и обеспечения возможности повторного моделирования некоторой ситуации, например, при изменении алгоритма обнаружения,

действий оператора и т.д., используется БД, в которой хранятся как некоторые промежуточные результаты, полученные при формировании РЛИ, так и сами РЛИ.

Таким образом, формирование РЛИ с задаваемыми статистическими характеристиками осуществляется следующим образом:

1. Формируются два двумерных массива независимых нормальных случайных величин (две квадратуры)  $S_{cij}$ ,  $S_{sij}$  со средним  $m1 = 0$  и дисперсией  $D = 1$ .

2. Вводится поправка  $\eta_i$ , корректирующая распределение вероятности для достижения адекватности распределению реальных отражений от местности:

$$U_{cij} = S_{cij} + p\eta_{cij}, \quad U_{sij} = S_{sij} + p\eta_{sij},$$

где  $p = \text{const}$ ,  $\eta_{cij}$  и  $\eta_{sij}$  – независимые случайные величины. Распределение  $\eta$ , его параметры и коэффициент  $p$  подбираются для обеспечения соответствия распределениям реальных РЛИ.

3. Имитация спекла осуществляется путем фильтрации выборок скользящим окном, длительность которого по каждой оси определяется разрешением по этой оси.

4. Имитация неоднородности РЛИ местности осуществляется за счет множителя  $\mu_i$ , характеризующего изменение интенсивности РЛИ с задаваемым коэффициентом корреляции возможно разным для разных направлений.

5. Проводится нормирование сигналов от фона и объектов, исходя из их ЭПР и разрешающей способности РСА.

6. Осуществляется суммирование отражений от местности и объектов с учетом фаз отраженных сигналов. Для этого указанное суммирование проводится в квадратурах:

$$W_{ci} = U_{ci} (1 + K\mu_i) + V_{ci}, \quad W_{si} = U_{si} (1 + K\mu_i) + V_{si},$$

где  $V_i$  - сигнал объекта,  $K$  – коэффициент неоднородности.

Коэффициент  $K$  определяет степень неоднородности, так что при  $K = 0$  РЛИ оказывается однородным.

7. Формируется РЛИ:  $F_i = \sqrt{W_{ci}^2 + W_{si}^2}$ .

**Моделирование ручного режима обнаружения и распознавания.** Режим ручного обнаружения и распознавания реализуется за счет действия оператора (операторов) РСА. Моделируется РЛИ, соответствующие анализируемой ситуации: фон, искомый объект, мешающие объекты и пр. Проводится анализ возможности обнаружения и распознавания объекта в задаваемых условиях при использовании различных алгоритмов работы операторов и их взаимодействия. Например, при двухэтапном обнаружении-распознавании в соответствии с [9] рассматривается взаимодействие операторов нескольких каналов. На первом этапе в канале с высокой контрастностью объектов искомого класса на фоне



местности выделяются в реальном времени «кандидаты» на искомый объект, а затем в другом канале с меньшей контрастностью, но с более высоким разрешением, возможно в псевдореальном времени, выявляется искомый объект среди «кандидатов». Оптимизируются вид, размеры и параметры РЛИ, находится оптимальное сочетание каналов, их обзорных и детальных РЛИ, оцениваются требования к точности предварительных данных о положении объекта и пр.

Однако возможность набора статистических данных крайне ограничена.

#### **Моделирование режима автоматизированного обнаружения и распознавания.**

Одним из наиболее вероятных направлений автоматизации процесса обнаружения-распознавания является автоматизация алгоритма поиска «кандидатов». Для этого могут быть рассмотрены различные варианты первичного поиска и обнаружения «кандидатов» с использованием разных частотных каналов и РЛИ с разным разрешением. На этом этапе важно оптимизировать соотношение ложных тревог и вероятности пропуска искомого объекта. Допустимое число ложных тревог определяется возможностями оператора РСА при его работе на втором этапе: в отведенное время необходимо провести распознавание нужного объекта среди «кандидатов».

При моделировании набор статистических данных по первому этапу может быть проведен за один сеанс имитации полета носителя РСА. Для набора статистики по ложным тревогам вычисления в соответствии с алгоритмом первичного обнаружения проводятся для всех неперекрывающихся участков поверхности РЛИ размером  $k \times m$ , в которых объекты отсутствуют ( $k$  и  $m$  – число выборок, занимаемых РЛИ объекта по осям  $X$  и  $Y$ ).

Для набора статистики по правильному обнаружению (или «пропуску цели») искомый объект размещают на статистически однородную поверхность в точках, число которых соответствует требованиям статистики, и так, чтобы объекты не перекрывались. При этом объекты могут иметь разную (случайную) ориентацию и случайный отраженный сигнал (в соответствии с задаваемым законом распределения ЭПР объекта). При моделировании осуществляют обнаружение объектов и определяют вероятности обнаружения.

Если стоит задача обнаружения при наличии других объектов, то эти объекты в нужном количестве могут быть также размещены в лоцируемой зоне или учтены при определении допустимого числа «кандидатов».

**Моделирование режима автоматического обнаружения и распознавания.** При моделировании режима автоматического обнаружения и распознавания технология моделирования остается той же, что и при моделировании 1-го этапа при

автоматизированном поиске «кандидатов». Так же имеются «пустые» места, по которым определяется вероятность ложного обнаружения и распознавания, и достаточное количество искомых объектов для получения вероятности правильного выявления этого объекта.

При практическом использовании ИМ очень важна разработка дружественного интерфейса, позволяющего менять задачи и исходные данные в широких пределах наглядно и просто.

### **Заключение**

Для решения разнообразных достаточно сложных задач внутреннего и внешнего проектирования РСА можно воспользоваться двумя взаимно дополняющими друг друга моделями. Это имитационная модель РСА, предназначенная для отработки алгоритмов пространственно-временной обработки и формирования РЛИ на его выходе, и комплекс смешанного (с участием операторов) моделирования РСА, используемый при решении задач обнаружения и распознавания объектов и оптимизации взаимодействия РСА со смежными системами. Многолетний опыт использования и совершенствования этих моделей подтверждает целесообразность их применения на разных этапах жизненного цикла РСА. При этом возможное участие в процессе моделирования операторов требует от КСМ моделирования в реальном временном масштабе, в то время как временной масштаб имитационной модели ограничивается только разумными временными рамками на моделирование.

Тем не менее, объем вычислений при имитационном моделировании РСА может быть очень большим. Для резкого сокращения вычислительных затрат внутриимпульсная обработка в РСА имитируется как корреляционно-фильтровая обработка. Это позволяет, с одной стороны, на порядки снизить вычислительные затраты. С другой стороны, такое представление внутриимпульсной обработки практически не ограничивает возможности имитационного моделирования РСА с разными алгоритмами пространственно-временной обработки и при использовании в РСА как простых, так и сложных, в том числе, сверхширокополосных зондирующих сигналов.

Кроме того, для сокращения вычислительных затрат в модели применяются известные и вновь разработанные упрощения обработки. При этом сохраняется возможность перехода от полностью согласованной обработки к различным уровням упрощения, в зависимости от решаемых задач. Использование в КСМ при моделировании операторов РСА не только позволяет осуществлять отработку действий операторов в различных условиях и

их обучение, но и обеспечивает при моделировании достижение адекватности реакции операторов и характеристик РСА характеристикам, получаемых в реальных условиях.

Для решения задач обнаружения и распознавания используются статистические методы формирования РЛИ с характеристиками близкими к характеристикам РЛИ, полученным при реальных работах. При этом в целях минимизации вычислительных и временных затрат, требуемых для набора достаточных статистических данных, в КСМ используется свойство эргодичности РЛИ местности (лес, луг, пашня и пр.) по пространству. В целях обеспечения прохождения процесса моделирования в реальном времени в КСМ используется предварительный расчет исходных детальных РЛИ.

Предложенный вариант построения БД предназначен для хранения полученных при предыдущих сеансах моделирования РЛИ и исходных массивов для их формирования. Это обеспечивает возможность анализа работы различных алгоритмов и действий операторов в одних и тех же условиях и, кроме того, это позволяет сократить временные затраты на подготовку данных, особенно РЛИ, осуществляемую до начала моделирования перед каждым сеансом моделирования.

## **Библиографический список**

1. Брызгалов А.П. Применение сверхширокополосных сигналов большой длительности в связи и локации. Всероссийская конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Сборник докладов. Муром, 2003г. С.22-27.
2. Брызгалов А.П. Обобщенная базовая корреляционная функция сверхширокополосных сигналов большой длительности. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. №1. С.84-96.
3. Теоретические основы радиолокации/. Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов.радио, 1970 г.
4. Брызгалов А.П., Караулова Е.В., Хныкин А.В. Аналого-цифровая обработка информации в радиолокаторах с синтезированной апертурой, использующих сверхширокополосные сигналы с линейной частотной модуляцией. // Цифровая обработка сигналов. №4, 2004 г.
5. Г.С. Кондратенков и А.Ю. Фролов «Радиовидение».М., «Радиотехника» 2005 г.
6. Брызгалов А.П., Караулова Е.В., Хныкин А.В.. Аналого-цифровая обработка последовательности сверхширокополосных линейно-частотно-модулированных импульсов большой длительности в РЛС с синтезированной апертурой. // 6-ая

Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение». - 2004, Москва. Доклады - 2, с.34.

7. Брызгалов А.П. Возможности применения сверхширокополосных сигналов большой длительности в локации и связи. // Юбилейная научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке». ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС», Российская академия ракетных и артиллерийских наук. Сборник докладов. Том II. Москва, 11-13 апреля 2006г.
8. Брызгалов А.П., Внученко А.В., Хныкин А.В., Юсупов Р.Г. Сверхширокополосная интегрированная система активной и пассивной локации и связи. // Юбилейная научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке». ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС», Российская академия ракетных и артиллерийских наук. Сборник докладов. Том II. Москва, 11-13 апреля 2006г.
9. Патент РФ № 2392635. Заявка на патент №2008122663/09 от 4.06.2008. Опубликовано 20.06.2010 Бюл.

### **Сведения об авторах**

Брызгалов Александр Петрович, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н. ул. Викторенко, д. 7, Москва, 125319; тел: (499) 157-93-28, e-mail: a\_bryzgalov@gosniias.ru

Ковальчук Илья Владимирович, инженер Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, ул. Викторенко, д. 7, Москва, 125319; тел: (499) 157-93-28, e-mail: ilya0406@ya.ru

Хныкин Алексей Владимирович, инженер Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, ул. Викторенко, д. 7, Москва, 125319; тел: (499) 157-93-28, e-mail: alexis\_x@mail.ru

Шевела Иван Александрович, инженер Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, ул. Викторенко, д. 7, Москва, 125319; тел: (499) 157-93-28, e-mail: jackson\_315@mail.ru

Юсупов Руслан Григорьевич, инженер Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, ул. Викторенко, д. 7, Москва, 125319; тел: (499) 157-93-28, e-mail: rus\_web@mail.ru