

На правах рукописи



Орешкина Маргарита Валерьевна

Имитация радиосигналов, отраженных от поверхности земли, на основе  
цифровых карт местности

Специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

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

**Научный руководитель:** **Киселев Алексей Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Роголина Лариса Геннадьевна,**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики», институт телекоммуникаций, кафедра радиотехнических устройств и техносферной безопасности, профессор;

**Колтышев Евгений Евгеньевич,**  
доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова», научно-исследовательское отделение 7, главный специалист

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита диссертации состоится «25» октября 2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2022.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.т.н., доцент

 Максим Андреевич Степанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Настройка, отладка и испытания являются неотъемлемыми этапами разработки и производства радиотехнических устройств и систем (РТС). В настоящее время для их осуществления широко применяются методы полунатурного моделирования. В этом случае в испытаниях задействованы реальные элементы или РТС в целом, а сигналы, приходящие на ее входы, формирует специальное программно-аппаратное устройство – имитатор. К достоинствам такого подхода, прежде всего, относится меньшая по сравнению с натурными испытаниями стоимость.

С помощью имитаторов сигналов можно проверять различные режимы работы РТС. Одной из важнейших задач является оценка возможностей их работы на фоне пассивных помех – мешающих отражений от объектов окружающей среды, в первую очередь от поверхности земли. Земля является подстилающей поверхностью, а отражения от нее выступают в качестве маскирующих помех, оказывающих значительное влияние на вероятностные характеристики обнаружения и оценки параметров сигналов, вероятности ошибок приема и др. При этом, согласно устоявшимся правилам (смотри, например, работы Бакулева П. А.), под поверхностью земли понимают землю не как планету, а как подстилающую поверхность, покровы которой (в том числе и водные) определяют характеристики отраженных от нее сигналов.

Поэтому моделирование отражений от подстилающих поверхностей является необходимым условием имитации реальной радиоэлектронной обстановки. Оно позволяет в лабораторных и заводских условиях оценить характеристики разрабатываемой или производимой РТС, а также осуществлять сопровождение ее натурных испытаний и т. д.

**Степень разработанности темы исследования.** Как и при моделировании любого иного объекта, наиболее острым вопросом при имитации сигналов, отраженных от поверхности земли, является обеспечение адекватности. В первую очередь это обусловлено сложностью задания отражающих свойств поверхности (определяемых удельной эффективной поверхностью рассеяния – УЭПР) в полном соответствии с отражениями от реальной местности.

Реальная земная поверхность имеет сложную неоднородную структуру, как в макромасштабе (сочетание разнородных типов покровов, таких как лес, луг, поля, горы и т. д.), так и в микромасштабе (неоднородности в пределах одного типа покрова, например, каждый участок леса состоит из различной комбинации деревьев, опушек, полян, затенений, и поэтому, невозможно найти два одинаковых участка). Такую поверхность называют статистически

неоднородной, в отличие от гипотетически существующей статистически однородной (имеющей один однородный покров).

В настоящее время имитационное моделирование сигналов практически всегда базируется на использовании цифровых технологий и методов формирования. Основой для имитации сигналов от земли служит цифровая карта, определяющая распределение покровов, высот и отражающих свойств по земной поверхности. По сути, используется дискретная цифровая модель поверхности.

При этом цифровой источник информации о распределении покровов и высот (цифровая карта) имеет ограниченную подробность, определяемую шагом между соседними отсчетами высот и ландшафта. Влияние этой дискретности на достоверность имитации эхосигналов от поверхности в настоящее время в литературе не рассмотрено, как и вопрос, каким должен быть шаг дискретизации, при котором обеспечивается заданный уровень ошибок имитации.

В большинстве доступных в настоящее время исследований (Бакулева П. А., Биллингслея Дж. Б., Греко М. С., Горошко Е. А., Зубковича С. Г., Кулемина Г. П., Мура Р. К., Мельника Ю. А., Натансона Ф. Е., Фарина А., Фенга С., Чена Дж. и др.) рассматривается, как правило, модель статистически однородной поверхности, а дискретность задания высот и покровов не учитывается. Более того, применительно к цифровым РТС связи используются простейшие модели, представляющие поверхность относительно небольшим (как правило, не более 30) количеством точек, формирующих эхосигнал. Распределенность отражающих свойств при этом игнорируется, а эхосигналы имитируются только для точечных отражателей.

Отмеченные моменты обуславливают расходимость оценок характеристик РТС, получаемых при натуральных испытаниях и в результате имитационного моделирования. Значительный вклад в эти ошибки вносит несоответствие распределения отражающих свойств по реальной поверхности земли распределению, задаваемому при имитации с использованием цифровых карт этой же местности.

**Цель работы** – обосновать требования к цифровой модели статистически неоднородной подстилающей поверхности, обеспечивающей заданную точность моделирования эхосигналов наземных РТС, отраженных от поверхности земли, а также обосновать методы имитации на ее основе.

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

1. Исследовать влияние дискретности представления распределения отражающих свойств статистически неоднородной поверхности земли на характеристики и параметры имитируемых сигналов от нее.

2. Обосновать методы задания максимального значения шага дискретизации в цифровой модели распределения отражающих свойств по поверхности земли, при котором обеспечивается заданный уровень ошибок моделирования эхосигналов.

3. Обосновать методы расчета отсчетов сигналов, отраженных от поверхности земли, по цифровой модели земной поверхности, обеспечивающие заданную точность при минимальных требованиях к вычислительным ресурсам средств имитации.

4. Развить полученные результаты до уровня их практического использования для построения имитаторов сигналов, отраженных от статистически неоднородной поверхности земли. Осуществить их экспериментальную апробацию.

### **Методы исследования**

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

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

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

1. Дискретность распределения отражающих свойств по статистически неоднородной подстилающей поверхности, заданных цифровой картой местности, существенно влияет на характеристики имитируемых эхосигналов от нее и должна учитываться при их имитации. Шаг дискретизации карты следует задавать исходя из допустимых погрешностей моделирования отражающих свойств земли, диаграмм направленности и излучаемого сигнала РТС, а также корреляционных характеристик отраженных сигналов.

2. Отказ от моделирования микромасштабных неоднородностей распределения УЭПР, а также его предварительная обработка фильтрами нижних частот позволяет снизить частоту дискретизации цифровой карты в десятки-сотни раз при сохранении заданной точности моделирования. Полоса пропускания фильтра, осуществляющего фильтрацию по наклонной дальности, должна определяться шириной спектра излучаемого сигнала РТС. А по азимуту – шириной преобразования Фурье диаграмм направленности передающей и приемной антенн РТС.

3. При имитации сигналов, отраженных от поверхности земли, целесообразно ее замещение моделями, содержащими малое количество точек

(начиная с 4-х на каждый элемент разрешения), формирующих взаимозависимые сигналы.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые исследовано влияние дискретности распределения отражающих свойств подстилающей поверхности, заданного цифровой картой местности, на энергетические и корреляционные свойства сигналов, отраженных от нее.

2. Получены соотношения, связывающие частоты дискретизации распределения УЭПР с погрешностями задания отражающих свойств поверхности, а также ошибками моделирования диаграмм направленности и комплексной огибающей излучаемого сигнала РТС.

3. Получены соотношения, обосновывающие отказ от имитации микромасштабных неоднородностей отражающих свойств поверхности земли, а также оценки снижения частоты дискретизации цифровой карты за счет ее низкочастотной фильтрации аналогичной классической фильтрации, предшествующей дискретизации сигналов.

4. Показано, что замещение поверхности земли моделью, составленной из точек, формирующих взаимозависимые сигналы, позволяет добиться замещения разрешаемых по азимуту и наклонной дальности участков поверхности малоточечными моделями (начиная с 4 точек).

#### **Практическая ценность работы**

Полученные результаты следует применять при создании средств и комплексов математического моделирования и имитации эхосигналов от поверхности земли.

1. Предложенные подходы к выбору шага дискретизации распределения УЭПР по поверхности земли позволяют формировать требования к шагу дискретизации цифровых карт поверхности земли исходя из требуемого уровня ошибок моделирования.

2. Обоснованные методы уменьшения частоты дискретизации за счет предварительной обработки исходного распределения УЭПР и использование моделей поверхности с зависимыми сигналами позволяют снизить требования к необходимым вычислительным ресурсам имитатора в сотни-тысячи раз.

3. Разработанный алгоритм синтеза дискретной модели распределения УЭПР по земной поверхности, а также разработанные алгоритмы имитации эхосигналов целесообразно использовать для разработки имитаторов входных сигналов наземных РТС.

#### **Внедрение результатов исследования**

На основе полученных результатов было разработано программное обеспечение имитационного комплекса, предназначенное для решения задач

имитации сигналов, отраженных от земли, в реальном масштабе времени. Внедрение программного обеспечения и результатов исследований в целом подтверждено соответствующими актами, представленными в приложении к работе.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации результаты исследований получены автором лично. Из 17 опубликованных работ 7 написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, относящиеся к тематике работы результаты получены автором лично.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

21 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2020; 22 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2021; XXII Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 14–15 мая 2020 г.; XX Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск, 17–19 апреля 2019 г.; International multi-conference on engineering, computer and information sciences (2019 SIBIRCON), Novosibirsk, 21–22 Oct. 2019; Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018), Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 17 работ, среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и 7 работ в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science или Scopus.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, включающего 105 наименований. Текст изложен на 171 странице, содержит 71 рисунок, 7 таблиц и 3 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, представлены ее цель и задачи, краткое содержание, научная новизна и практическая значимость.

**В первом разделе** рассмотрено текущее состояние вопросов имитации эхосигналов от земной поверхности, сформулирована цель и задачи исследования.

Как известно, эхосигнал, отраженный от земной поверхности, представляет собой нестационарный нормальный случайный процесс. Его мощность, корреляционные функции быстрых (при периодическом сигнале называемых внутривнутрипериодными) и медленных, доплеровских (называемых также межпериодными), флуктуаций зависят от многих факторов, в том числе от распределения по поверхности ее УЭПР, от формы, параметров и положения диаграмм направленности (ДНА) антенной системы РТС, параметров ее излучаемого сигнала и т. д.

Подчеркнуто, что в настоящее время подавляющее большинство исследований характеристик эхосигналов и обоснование методов их имитации выполнено для статистически однородной поверхности, имеющей покров одного вида без микромасштабных неоднородностей.

Вместе с тем реальная земная поверхность имеет сложную неоднородную структуру. В частности, это хорошо видно на ее оптических и радиолокационных изображениях.

Экспериментальные данные показывают следующее.

Для любого участка поверхности УЭПР можно представить как сумму:

$$\sigma(\alpha, r) = \sigma_{st}(\alpha, r) + \sigma_{fl}(\alpha, r),$$

где  $\sigma_{st}(\alpha, r)$ ,  $\sigma_{fl}(\alpha, r)$  – стабильная и флуктуирующая компонента УЭПР в точке с азимутальной координатой  $\alpha$  и координатой  $r$  по наклонной дальности.

Стабильная компонента определяет макромасштабные изменения УЭПР. А флуктуирующая компонента отвечает за микромасштабные неоднородности – локальные изменения значений УЭПР.

Показано, что неоднородность поверхности и дискретность ее модели, обусловленная применением цифровых карт, значительно влияют на энергетические и корреляционные свойства имитируемых эхосигналов. Например, мощность эхосигнала может изменяться на десятки децибел, а коэффициенты внутривнутрипериодной и межпериодной корреляции могут изменяться в диапазоне от нуля до почти единицы, в то время как для непрерывной однородной поверхности они постоянны.

На основании сделанного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** обоснованы методы синтеза дискретных моделей статистически неоднородной земной поверхности, обеспечивающие заданную точность моделирования эхосигналов.

Использована близость задачи дискретизации распределения УЭПР с дискретизацией непрерывного сигнала.

Рассмотрена наиболее явная и важная характеристика эхосигналов – их мощность, а точнее, ее зависимость от углового положения луча антенны при

фиксированной дальности. Анализ этой характеристики позволил получить результаты, применимые к корреляционным функциям.

При сканировании ДНА по азимуту мощность эхосигналов, приходящих от линии равной дальности (для ДНА, допускающих разделение переменных), определяется как:

$$P(\alpha_{00}, \theta_{00}, r) \sim \int_0^{2\pi} F_\alpha^2(\alpha - \alpha_{00}) R_r(\alpha, r, \theta_{00}) d\alpha, \quad (1)$$

где  $R_r(\alpha, r, \theta_{00}) = F_\theta^2(\theta(r) - \theta_{00}) \sigma(\alpha, r)$ ;  $F_\alpha$  – произведение диаграмм направленности передающей и приемной антенн РТС в азимутальной плоскости в направлении  $\alpha$ ;  $F_\theta$  – произведение диаграмм направленности передающей и приемной антенн РТС в угломестной плоскости в направлении  $\theta$ ;  $\alpha_{00}, \theta_{00}$  – положение осей ДНА по азимуту и углу места.

При использовании дискретной карты (рисунок 1) вместо непрерывного распределения УЭПР имеем набор дискретных значений  $\sigma_d(\alpha_m, r_n)$  (где  $\alpha_m, r_n$  – положение  $m, n$  отсчета УЭПР по азимуту и наклонной дальности). В этом случае мощность эхосигналов от поверхности

$$P_d(\alpha_{00}, \theta_{00}, r_n) \sim \sum_{m=0}^{M-1} F_\alpha^2(\alpha_{00} - \alpha_m) R_d(\alpha_m, r_n, \theta_{00}), \quad (2)$$

где  $R_d(\alpha_m, r_n, \theta_{00}) = F_\theta^2(\theta(r_n) - \theta_{00}) \sigma_d(\alpha_m, r_n)$ ;  $M$  – количество положений отсчетов по азимуту.

В выражениях (1) и (2) часть функций зависят от  $\alpha$ , а часть параметров от разности  $\alpha - \alpha_{00}$ .

Нетрудно заметить, что (1) представляет собой свертку функции  $R_r$  и функции  $F_\alpha^2$ . В свою очередь, (2) является сверткой дискретной функции  $R_d$  и функции  $F_\alpha^2$ . Если перейти в частотную область, то согласно свойствам преобразования Фурье получим следующие соотношения:

$$G_P(k, \theta_{00}, r_n) \sim G_F(k) G_R(k, \theta_{00}, r_n),$$

$$G_{Pd}(k, \theta_{00}, r_n) \sim G_F(k) G_{Rd}(k, \theta_{00}, r_n) \sim G_F(k) \sum_{i=-\infty}^{\infty} G_R\left(k + i \frac{1}{\Delta\alpha}, \theta_{00}, r_n\right),$$

где  $G_P$  – спектр функции  $P(\alpha_{00}, \theta_{00}, r)$ ;  $G_F$  – спектр функции  $F_\alpha$ ;  $G_R$  – спектр функции  $R_r$  по координате  $\alpha$ ;  $G_{Pd}$  – спектр дискретной функции  $P_d(\alpha_{00}, \theta_{00}, r_n)$ ;  $G_{Rd}$  – спектр дискретной функции  $R_d$  по координате  $\alpha$ ;  $k$  – вещественная переменная, имеющая смысл пространственной частоты.

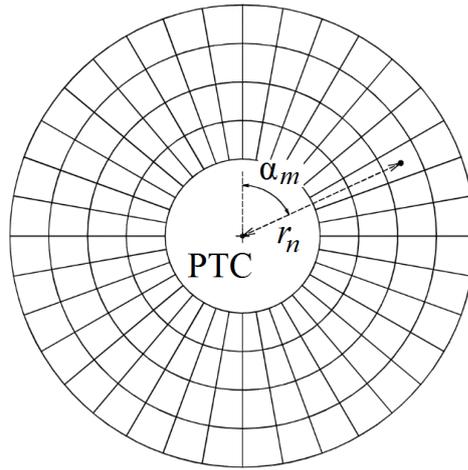


Рисунок 1 – Сетка, показывающая разбиение поверхности при дискретизации. Помечен отсчет с координатами  $\alpha_m, r_n$ , где  $m, n$  – индексы отсчетов по азимуту и наклонной дальности

Спектр дискретной функции  $R_d$  имеет очевидное свойство. Из-за дискретности  $\sigma_d$  он является повторяющимся с шагом, равным  $1/\Delta\alpha$ , где  $\Delta\alpha$  – шаг дискретизации по  $\alpha$ . Это приводит к известному явлению, называемому наложением спектров.

Если область, в которой возникают наложения, входит в область, занимаемую спектром функции  $F_\alpha^2$ , то спектр функции  $P_d$  будет отличаться от спектра, полученного в случае, когда функция  $R_r$  задана непрерывной.

Модули спектров  $F_\alpha^2$  и  $R_r$  убывают с ростом частоты, и их можно ограничить по ширине частотными интервалами:  $-k_{up\_F}, k_{up\_F}$  для спектра  $F_\alpha^2$  и  $-k_{up\_R}, k_{up\_R}$  для спектра  $R_r$ .

Из условия непересечения ограниченных по ширине спектров функций  $F_\alpha^2$  и  $R_r$  получим требование к частоте дискретизации по азимутальной координате (рисунок 2):

$$k_d \geq k_{up\_F} + k_{up\_R}.$$

Для координаты наклонная дальность зависимость мощности (для радиолокационных задач – сжатого импульса) от времени можно представить как свертку функции  $R_r$  и функции  $|\dot{B}(t)|^2$  – квадрата модуля комплексной огибающей эхосигнала, прошедшего тракт приемника (для радиолокационных задач – сжатого зондирующего импульса). Их спектры также ограничиваются по ширине.

Тогда требование к частоте дискретизации по наклонной дальности:

$$f_d \geq f_{up\_B} + f_{up\_R},$$

где  $f_{up\_B}$  – верхняя частота в спектре функции  $|\dot{B}(t)|^2$ ;  $f_{up\_R}$  – верхняя частота в спектре функции  $R_r$ .

Полученные результаты обобщены на корреляционные функции флуктуаций эхосигналов. Для их моделирования верхние частоты определяются так:

$$k_d \geq \max(k_{up\_FF}(\Delta\alpha_{00})) + k_{up\_R};$$

$$f_d \geq \max(f_{up\_BB}(\Delta\tau_{00})) + f_{up\_R},$$

где  $\Delta\alpha_{00}$  – сдвиг оси ДНА по азимуту за период поворота излучаемого сигнала;  $k_{up\_FF}$  – верхняя частота в спектре функции  $FF_\alpha(\alpha_{00}, \Delta\alpha_{00}) = F_\alpha(\alpha_{00})F_\alpha(\alpha_{00} - \Delta\alpha_{00})$ ;  $f_{up\_BB}$  – верхняя частота в спектре функции  $BB(t, \Delta\tau_{00}) \sim |\dot{B}(t)\dot{B}^*(t - \Delta\tau_{00})|$ ;  $\Delta\tau_{00}$  – сдвиг по временной оси.

Дальнейшие исследования сводятся к получению оценок частот  $k_{up\_R}$ ,  $f_{up\_R}$ ,  $k_{up\_F}$ ,  $f_{up\_B}$ ,  $k_{up\_FF}$  и  $f_{up\_BB}$ .

Метод оценки  $k_{up\_R}$ ,  $f_{up\_R}$  зависит от подробности располагаемой цифровой карты.

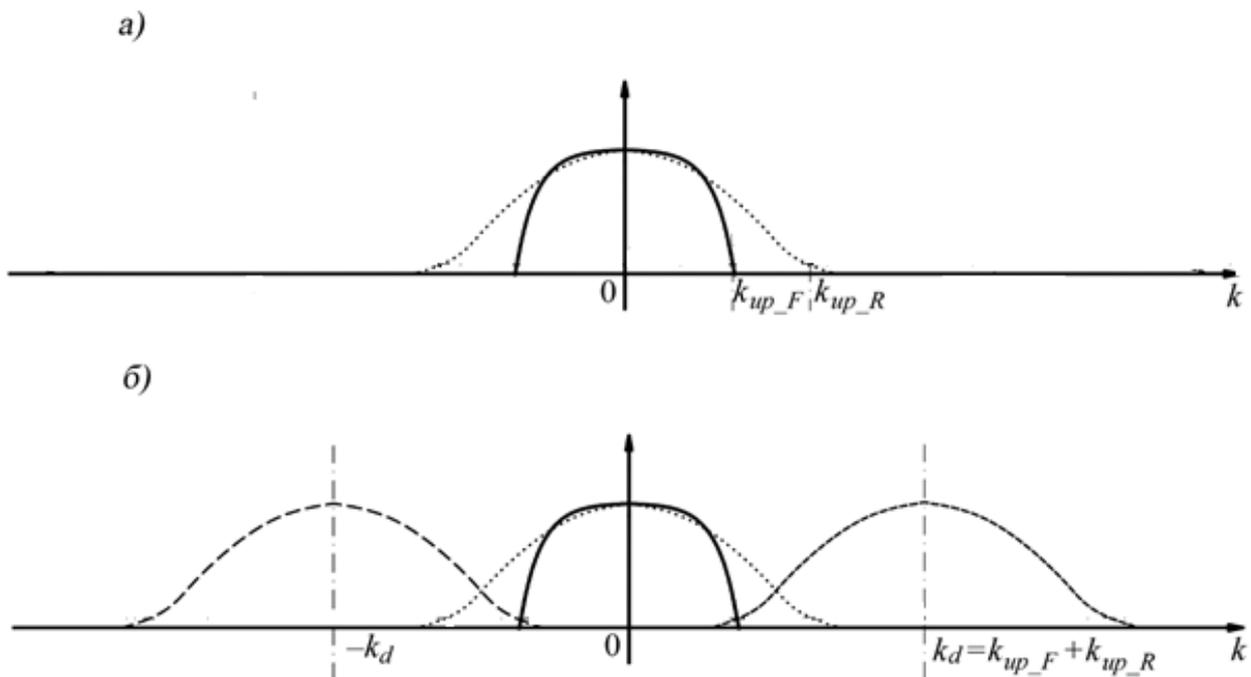


Рисунок 2 – Задание верхних частот в спектрах  $G_F$  и  $G_R$  (а) и выбор частоты дискретизации (б). Сплошной линией показан спектр функции  $G_F$ , пунктирной линией – спектр  $G_R$ , штриховой линией обозначены смещенные спектры  $G_R$

### 1. Выбор шага дискретизации при доступности карт сколь угодно высокого разрешения.

В этом случае алгоритм расчета  $k_{up\_R}$  и  $f_{up\_R}$  достаточно очевиден. По карте с наивысшим разрешением рассчитываются спектры  $G_R(k, \theta_{00}, r_n)$  и  $G_{R\tau}(f, \theta_{00}, \alpha_m)$  для возможных  $n$  и  $m$ . По ним определяются частоты  $k_{up\_R}(n)$  и  $f_{up\_R}(m)$  как границы, за пределами которых площади под спектральными характеристиками, отнесенные к площади под неусеченным спектром, не превысят заданный уровень. Наибольшие значения из полученных массивов  $k_{up\_R}(n)$  и  $f_{up\_R}(m)$  и принимаются в качестве оценок  $k_{up\_R}$  и  $f_{up\_R}$ .

## 2. Выбор шага дискретизации при доступности карт малого разрешения. Оценки для “наихудшего покрова”.

Предположим, что имеет место единственный покров. Оценим относительный уровень ошибки флуктуирующей составляющей  $\sigma(\alpha, r)$ , обусловленной отсечением спектра за пределами  $\pm k_{up\_R}$  и  $\pm f_{up\_R}$ .

Для этого воспользуемся имеющимися в литературе экспериментальными данными, которые говорят о том, что флуктуирующая составляющая УЭПР имеет экспоненциальный коэффициент корреляции.

Это позволяет найти аналитические выражения для уровней относительных ошибок и частот  $k_{up\_R}$  и  $f_{up\_R}$ :

$$\varepsilon_{er\_R\_s} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg(2\pi\rho_\alpha k_{up\_R}); \quad \varepsilon_{er\_R\tau\_s} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg(2\pi\rho_r f_{up\_R}); \quad (3)$$

$$k_{up\_R} = \frac{1}{2\pi\rho_\alpha} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}(1 - \varepsilon_{er\_R\_s})\right); \quad f_{up\_R} = \frac{1}{2\pi\rho_r} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}(1 - \varepsilon_{er\_R\tau\_s})\right), \quad (4)$$

где  $\rho_\alpha, \rho_r, \varepsilon_{er\_R\_s}, \varepsilon_{er\_R\tau\_s}$  – радиусы корреляции  $\sigma_{fl}(\alpha, r)$  по азимуту и наклонной дальности и относительные уровни ошибок по этим же осям.

Видно, что при прочих равных условиях  $k_{up\_R}$  и  $f_{up\_R}$  участка, имеющего несколько покровов, будет во многом определяться покровом с меньшими  $\rho_\alpha$  и  $\rho_r$ .

Если покровов несколько, то в качестве оценок  $k_{up\_R}$  и  $f_{up\_R}$  можно использовать наибольшие значения, полученные для присутствующих покровов. По сути, можно ограничиться единственным покровом. Для реализации этого подхода достаточно располагать  $\rho_\alpha$  и  $\rho_r$  для «наихудшего» покрова, для которого эти радиусы имеют наименьшие значения. Эта оценка будет завышенной, но гарантированно обеспечит заданный уровень ошибок (например, для травяного покрова шаг дискретизации цифровой карты составит порядка четырех метров (при уровне относительной ошибки 10%)).

Такая оценка имеет два очевидных применения.

**Во-первых**, ее можно использовать для принятия решения о достаточности подробности цифровой карты с точки зрения обеспечения требуемого уровня ошибок, обусловленных дискретизацией. Если значения  $2k_{up\_R}$  и  $2f_{up\_R}$  полученные в (4) оказываются меньшими, чем у располагаемых цифровых карт, то эти карты могут быть использованы. Их подробность гарантированно не приведет к снижению точности моделирования.

**Во-вторых**, ее можно использовать для оценки уровня ошибок, возникающих при использовании карт недостаточно высокого разрешения. Если значения  $2k_{up\_R}$  и  $2f_{up\_R}$  оказались большими, чем у располагаемых цифровых карт, то использование этих карт не гарантирует обеспечение требуемого уровня относительных ошибок  $\varepsilon_{er\_R\_c}$  и  $\varepsilon_{er\_Rt\_c}$ . Ожидаемый уровень ошибок в этом случае нетрудно получить, подставив частоты дискретизации располагаемых карт в выражение (3).

**Оценки**  $k_{up\_F}$ ,  $f_{up\_B}$ ,  $k_{up\_FF}$ ,  $f_{up\_BB}$ .

Анализ  $k_{up\_F}$  и  $k_{up\_FF}$  был выполнен для аппроксимаций главных лепестков ДНА функциями Гаусса, а также главными лепестками функции sinc, косинус в квадрате и косинус в кубе. Для каждой из них были найдены спектры функций  $F_{\alpha}^2(\alpha)$ ,  $FF_{\alpha}(\alpha, \Delta\alpha_{00})$  и зависимости их относительных ошибок от  $k_{up\_F}$  и  $k_{up\_FF}$ .

Анализ  $f_{up\_B}$  и  $f_{up\_BB}$  был выполнен для аппроксимаций главных лепестков сжатых излучаемых сигналов РТС функциями Гаусса, сжатого простого, ЛЧМ и ФКМ сигнала. Были найдены спектры функций  $B_{\alpha}^2(t)$ ,  $BB(t, \Delta\tau_{00})$  и зависимости их относительных ошибок от  $f_{up\_B}$  и  $f_{up\_BB}$ .

Численные оценки  $k_{up\_FF}$  и  $f_{up\_BB}$  показали, что их превышения над  $k_{up\_F}$  и  $f_{up\_B}$  составляют не более 10 %. Это позволяет использовать результаты, полученные для мощности, при увеличенных частотах  $k_{up\_F}$  и  $f_{up\_B}$ .

**В дополнение к спектральному подходу** к выбору шага дискретизации в работе найдены соотношения, позволяющие оценить влияние дискретизации на математическое ожидание и дисперсию мощности имитируемого эхосигнала. Они позволяют определять шаг дискретизации, при котором обеспечивается заданная точность получения этих характеристик.

В целом в разделе обоснованы методы расчета шага дискретизации распределения УЭПР по земной поверхности.

**В третьем разделе** обоснованы методы имитации эхосигналов от статистически неоднородной поверхности земли.

Оценки требований к ресурсам вычислительных средств, необходимых для формирования отсчетов имитируемого сигнала в реальном масштабе времени, показывают, что они очень высоки. Приведенные в работе простейшие расчеты для частного случая РТС – наземной РЛС обзора воздушного пространства – показывают, что для поверхности, покрытой травой, и типичных для наземных РЛС параметров зондирующего импульса получим не менее  $10^9$  арифметических операций, выполняемых за один период повторения зондирующего импульса. Их осуществление потребует применения специальных вычислительных средств, ставящих под сомнение экономическую целесообразность имитации.

Поэтому основное внимание при обосновании методов имитации эхосигналов было уделено исследованию решений, позволяющих снизить эти требования.

1. Получены соотношения, позволяющие оценить ошибки при игнорировании флуктуирующей компоненты распределения УЭПР.

Установлено, что с ростом шага дискретизации относительный вклад  $\sigma_{fl}(\alpha, r)$  в  $\sigma(\alpha, r)$  снижается. Получено соотношение, определяющее этот вклад в мощность эхосигнала в зависимости от шага дискретизации и радиусов корреляции  $\sigma_{fl}(\alpha, r)$  по координатам  $\alpha$  (радиус  $\rho_\alpha$ ) и  $r$  (радиус  $\rho_r$ ):

$$c_v(\Delta\alpha_L, \Delta r) = \frac{\sqrt{4D_{fl}\rho_\alpha\rho_r \left( \Delta\alpha_L - \rho_\alpha + \rho_\alpha \exp\left(\frac{-\Delta\alpha_L}{\rho_\alpha}\right) \right) \left( \Delta r - \rho_r + \rho_r \exp\left(\frac{-\Delta r}{\rho_r}\right) \right)}}{\Delta\alpha_L \Delta r \sigma_{st} \left( \frac{\alpha_{en} - \alpha_{st}}{2}, \frac{r_{en} - r_{st}}{2} \right)} 100\% ,$$

где  $\Delta\alpha_L \Delta r$  – шаг дискретизации поверхности по азимуту и наклонной дальности;  $\alpha_{st}, \alpha_{en}, r_{st}, r_{en}$  – границы рассматриваемого участка по азимуту и наклонной дальности;  $D_{fl}$  – дисперсия флуктуирующей компоненты УЭПР.

Уровень этого вклада можно использовать в качестве критерия, по которому оценивается необходимость учета «случайной» компоненты УЭПР. Численные оценки показали, что отказ от нее позволяет увеличить шаг дискретизации в десятки-сотни раз.

2. Рассмотрено увеличение шага дискретизации за счет использования низкочастотной фильтрации (аналогичной классической фильтрации, предшествующей дискретизации сигналов) с последующей децимацией цифровой карты. Показано, что предварительная обработка распределения УЭПР, заключающаяся в фильтрации по  $\alpha$  и  $r$  фильтром нижних частот с полосами пропускания  $k_{up\_F}$  и  $f_{up\_B}$ , позволяет снизить частоту дискретизации и количество отсчетов в  $(k_{up\_F} + k_{up\_R}) / 2k_{up\_F}$  и  $(f_{up\_R} + f_{up\_B}) / 2f_{up\_B}$  раз.

Численные оценки, выполненные для реальных распределений УЭПР, показали, что фильтрация позволяет снизить частоты дискретизации в десятки-сотни раз.

3. Рассмотрено замещение поверхности земли моделью, составленной из точек, формирующих взаимозависимые сигналы.

Известно, что модель из двух точек, не разрешаемых РТС, воспринимается РТС как одна точка (называемая кажущимся центром излучения – КЦИ), положение которой зависит от амплитудно-фазовых соотношений между сигналами от первой и второй точек модели.

Для имитации нескольких точек, имеющих разное угловое положение, достаточно разделить сигналы каждой из точек поверхности между двумя точками модели в пропорции, определяемой требуемым положением КЦИ.

Применим рассмотренное решение к нашей задаче.

Расположим точки модели на изодальностях с шагом, равным  $2\Delta\alpha_M$ , выбранным из условия обеспечения допустимого уровня искажений функции  $F_\alpha(\alpha)$ .

Для координаты наклонная дальность: расположим точки модели на линиях постоянного азимута (идущих с шагом, равным  $2\Delta\alpha_M$ ) с шагом (обозначим его  $2\Delta r_M$ ), выбранным из условия обеспечения допустимого уровня искажений функции  $B(t)$ .

При этом каждая четверка позволит заместить точки поверхности, находящиеся между ними. Совокупность четверок заместит поверхность в целом (рисунок 3).

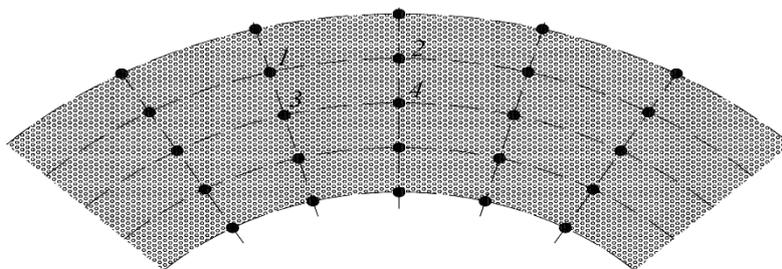


Рисунок 3 – Черные точки соответствуют модели, кружки – точкам поверхности

Полученные в работе соотношения позволяют сформировать сигналы точек модели (рисунок 3), обеспечивающие такое замещение поверхности.

Разработка аппаратно-программного комплекса (раздел 4) показала, что рассмотренные в третьем разделе меры снижают требования к ресурсам средств вычислительной техники до возможностей персонального компьютера.

**В четвертом разделе** полученные результаты развиты до уровня их практического использования.

Разработан обобщенный алгоритм расчета шага дискретизации УЭПР, включающий следующие основные этапы:

- задание параметров РТС (тип и параметры излучаемого сигнала, ДНА антенны и ее ширина и др.), ее положения на местности;
- расчет  $k_{up\_F}$ ,  $k_{up\_FF}$ ,  $f_{up\_B}$ ,  $f_{up\_BB}$  для заданных параметров РТС;
- расчет  $k_{up\_R}$  с учетом затенений, заданного положения РТС и других факторов (в качестве исходных берутся цифровые карты ландшафтов и высот в стандартных форматах RWS и MTW);
- формирование дискретного распределения УЭПР в пределах области, от которой имитируется эхосигнал;
- оценка возможности отказа от микромасштабных неоднородностей;
- оценка необходимости низкочастотной фильтрации и ее осуществление с последующей децимацией цифровой карты;
- формирование финального распределения УЭПР.

Затем осуществляется формирование массивов заранее подготавливаемых данных и начинается вычисление отсчетов комплексной огибающей имитируемых сигналов (в реальном масштабе времени).

Практическая апробация результатов осуществлялась при разработке аппаратно-программного комплекса имитации типичного представителя наземных РТС эхосигналов радиолокационной станции (РЛС) обзора воздушного пространства и обнаружения воздушных целей (рисунок 4), а точнее его программного обеспечения.

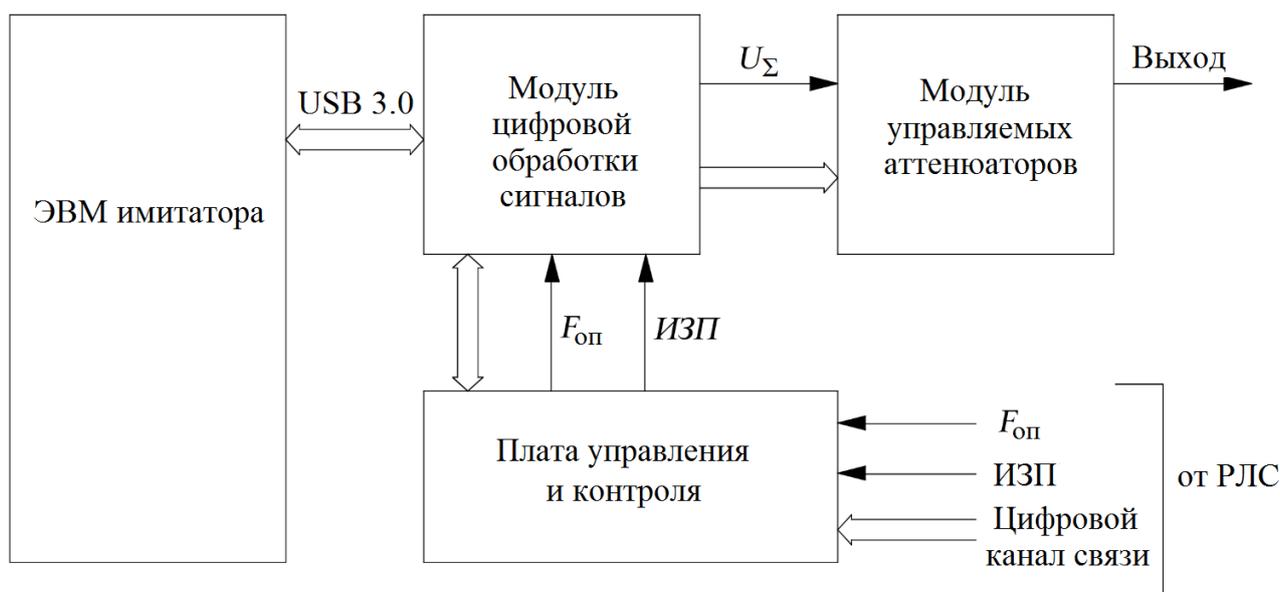


Рисунок 4 – Укрупненная структура имитатора.  $F_{оп}$ , ИЗП – сигналы опорной частоты и начала излучения зондирующего импульса.  $U_{\Sigma}$  – имитируемый аналоговый сигнал на промежуточной частоте приемника РЛС

Алгоритм синтеза распределения УЭПР был использован в полном объеме.

Алгоритм вычисления отсчетов имитируемого сигнала имел следующий вид. Работающая с имитатором РЛС имеет ограниченное и заранее известное количество положений оси ДНА по углу места. Это позволило свести операции, выполняемые в реальном времени, к вычислениям сумм вида:

$$\dot{S}_{\Sigma}(q, n, \alpha_{00}, \theta_{00}) = \sum_{m=m_1(\alpha_{00})}^{m_2(\alpha_{00})} F_{\alpha}(\alpha_m - \alpha_{00}) \dot{S}_{punkt}(q, m, n, \theta_{00}), \quad (5)$$

где  $m_1(\alpha_{00})$ ,  $m_2(\alpha_{00})$  – индексы крайних отсчетов УЭПР, попадающих в пределы главного лепестка ДНА по азимуту, при положении луча антенны по азимуту  $\alpha = \alpha_{00}$ ;  $\dot{S}_{punkt}(q, m, n, \theta_{00})$  – сигналы, имитирующие отражения от точек поверхности земли;  $q$  – номер отсчета имитируемого сигнала.

Массивы  $\dot{S}_{punkt}(q, m, n, \theta_{00})$  формируются заранее и хранятся в памяти ЭВМ имитатора.

Благодаря использованию результатов раздела три, количество суммируемых отсчетов в формуле (5) равно пяти. Ресурсы ЭВМ позволили отвести на вычисление одного отсчета  $\dot{S}_{\Sigma}(q, n, \alpha_{00}, \theta_{00})$  около 0.3 мкс (что намного превышает необходимое значение). Объем памяти ЭВМ, необходимый для хранения  $\dot{S}_{punkt}(q, m, n, \theta_{00})$ , обеспечивающих непрерывную имитацию в течение часа, составил менее 200 Гб. Это позволило использовать в имитаторе широкодоступный персональный компьютер (материнская плата Gigabyte GA-H110TN, процессор Intel Core i5-6600 3.3 ГГц, модуль памяти DDR4 2133MHz 4Gb, твердотельный жесткий диск Kingston SM200S3240G).

На основе рассмотренных алгоритмов было разработано программное обеспечение, оно подробно рассмотрено в диссертационной работе. Там же приведены результаты совместной работы имитатора и РЛС.

В целом результаты разработки и внедрения комплекса подтвердили справедливость и практическую ценность выполненных исследований.

**В приложении А** приведены оценки частот  $k_{ур\_F}$ ,  $k_{ур\_FF}$ ,  $f_{ур\_B}$ ,  $f_{ур\_BB}$  для наиболее распространенных аппроксимаций главного лепестка ДНА и излучаемого сигнала. **В приложении Б** представлены зависимости уровня ошибок, возникающих при замещении точечного объекта КЦИ четырехточечной моделью. **В приложении В** приведены акты о внедрении результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе обоснованы требования к цифровой модели статистически неоднородной подстилающей поверхности, обеспечивающей

заданную точность моделирования эхосигналов наземных РТС, а также обоснованы методы имитации на ее основе.

#### **Поставлены и решены следующие основные задачи.**

1. Установлено влияние дискретности представления распределения отражающих свойств статистически неоднородной поверхности земли на характеристики и параметры имитируемых эхосигналов от нее.

2. Обоснованы способы задания максимального значения шага дискретизации цифровой карты, при котором обеспечивается заданный уровень ошибок моделирования сигналов, отраженных от поверхности земли.

3. Обоснованы методы расчета отсчетов имитируемых эхосигналов по цифровой модели земной поверхности.

4. Полученные результаты развиты до уровня их практического использования для построения имитаторов эхосигналов от статистически неоднородной поверхности земли.

**Полученные в работе результаты целесообразно применять** при создании комплексов имитации входных сигналов и помех наземных РТС. В первую очередь для наземных РЛС.

При этом предложенные подходы к выбору шага дискретизации распределения УЭПР по поверхности земли, а также обоснованные методы формирования имитирующих сигналов позволяют в сотни-тысячи раз снизить требования к ресурсам вычислительных средств аппаратно-программного имитирующего комплекса при гарантированном уровне ошибок моделирования.

**В качестве направлений дальнейших исследований** уместно рассматривать имитацию эхосигналов от поверхности земли применительно к РТС цифровой связи, бистатистическим системам, а также бортовым РТС (РТС, установленным на подвижном носителе, бортовым РЛС обзора земной поверхности, радиовысотомерам и РТС иного назначения).

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

1. Орешкина, М. В. Дискретное представление отражающих свойств земной поверхности при имитации эхосигналов от нее / М. В. Орешкина, А. В. Киселев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. – 2020. – № 4. – С. 10–13.

2. Орешкина, М. В. Погрешность моделирования эхосигналов от поверхности земли при дискретном задании ее отражающих свойств /

М. В. Орешкина // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. – 2019. – № 4. – С. 11–15.

3. Орешкина, М. В. Влияние дискретности цифровой карты земной поверхности на точность моделирования эхосигналов от нее / М. В. Орешкина // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. – 2018. – № 4. – С. 10–13.

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

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

5. Oreshkina, M. Digital Earth surface maps for radar ground clutter simulation / M. Oreshkina, M. Stepanov, A. Kiselev // Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2022. – Vol. 33, iss. 2. – P. 340 – 344.

6. Simulation of reflected signals in dual-position radar systems/ T. I. Sabitov, A. V. Kiselev, M. A. Stepanov, M. V. Oreshkina. // Remote Sensing Letters. – 2021. – Vol. 12, iss. 11. – P. 1082–1089.

7. Oreshkina, M. V. Discrete model of earth reflectivity for land clutter simulation / M. V. Oreshkina, A. V. Kiselev // International multi-conference on engineering, computer and information sciences (2019 SIBIRCON), Novosibirsk, 21 Oct. 2019. – Novosibirsk : IEEE, 2019. – P. 639–640.

8. Oreshkina, M. V. Simulation of land clutter for surveillance radar based on reflected power dataset / M. V. Oreshkina // IEEE 22 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk : IEEE, 2021. – P. 214–217.

9. Oreshkina, M. V. An approach for increasing the discretization interval along radial coordinate in terrain reflections model / M. V. Oreshkina // IEEE 21 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proc., Altai Region, 29 June – 3 July 2020. – Novosibirsk : IEEE, 2020. – P. 134–137.

10. Oreshkina, M. V. On the errors arising from the use of discrete surface models for land clutter simulation / M. V. Oreshkina, A. V. Kiselev // XIV International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering (APEIE), Novosibirsk, 2-6 Oct 2018. – Novosibirsk : IEEE, 2018. – P. 432–433.

11. Oreshkina, M. V. The effect of terrain model discreteness on the errors of land clutter simulation / M. V. Oreshkina, A. V. Kiselev // XIV International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering (APEIE), Novosibirsk, 2-6 Oct 2018. – Novosibirsk : IEEE, 2018. – P. 429–431.

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

12. Орешкина, М. В. Требования к подробности задания отражений от земли с учетом диаграммы направленности антенны РЛС / М. В. Орешкина // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 20 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 17–19 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Т. 2. – С. 255–258.

13. Орешкина, М. В. Свойства отражений от земной поверхности и их модели / М. В. Орешкина // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 18–20 апр. 2018 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 2. – С. 236–238.

14. Орешкина, М. В. Корреляционная функция радиолокационных помех от неоднородной поверхности земли / М. В. Орешкина // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 266–268.

15. Орешкина, М. В. Коэффициент корреляции эхосигналов при сканировании неоднородной поверхности земли / М. В. Орешкина // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, посвящ. 122-й годовщине Дня радио, Красноярск 4–5 мая 2017 г. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2017. – С. 19–21.

16. Орешкина, М. В. Коэффициент корреляции эхосигналов при сканировании неоднородной поверхности земли / М. В. Орешкина // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 12. – С. 118–119.

17. Орешкина, М. В. Построение математической модели земной поверхности для вычисления корреляционных характеристик эхосигнала наземной РЛС кругового обзора / М. В. Орешкина // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, посвящ. 125-й годовщине Дня радио, Красноярск, 14–15 мая 2020 г. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2020. – С. 17–21.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ №1180. Подписано в печать 07.07.2022 г.