

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалавр)

На тему «**Возможные пути модернизации труднопроходимых портов арктической зоны с использованием новых технологий**»

Исполнитель

Часовников Артур Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

Кандидат технических наук
(ученая степень, ученое звание)

Чернецова Елена Анатольевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой



(Подпись)

Доктор технических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Санкт-Петербург

2025 год

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Морские информационные системы

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой МИС

_____ / Сикарев И.А.

«__» _____ 2025 г.

Задание

на выпускную квалификационную работу

Студенту Часовникову Артуру Владимировичу

1. Тема «Разработка имитационной модели РЛС средствами Матлаб»

закреплена приказом ректора Университета от «15» ноября 2025 г.
года, №1378-с

2. Срок сдачи законченной работы

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе:

Научные статьи, проектная документация, учебные пособия.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке (краткое содержание работы):

- Введение. Актуальность темы, цели и задачи ВКР.
- Глава 1. Структура модели радиолокационной станции.
- Глава 2. Структура модели зондирующего и отраженного от цели сигналов.
- Глава 3. Имитационная модель РЛС.
- Заключение. Выводы по работе в целом. Оценка степени решения поставленных задач. Практические рекомендации.

5. Перечень материалов, предоставляемые к защите:

-Иллюстративные материалы.

-Пояснительная записка.

6. Консультанты по работе:

Дата выдачи задания: «___» _____ 2025 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Доцент кафедры МИС, к.т.н., Чернецова Е.А.



(должность, ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество)

(подпись)

Задание приняла к исполнению «___» _____ 2025 г.

Часовников Артур Владимирович КВ-Б21-2

(фамилия, имя, отчество, учебная группа)

(подпись)

РЕФЕРАТ

Дипломная работа: 45 страниц, 31 рисунков, 3 источников литературы.

Объект исследования является радиолокационные станции (РЛС), их структура, принципы работы и обработки сигналов, а также методы имитационного моделирования таких систем.

Предмет исследования является имитационная модель радиолокационной станции, разработанная в среде MATLAB/Simulink, включая её функциональные блоки, алгоритмы обработки сигналов и интеграцию радиочастотных компонентов.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка и исследование имитационной модели РЛС в MATLAB/Simulink для анализа её работы, оценки влияния различных параметров и помех на эффективность обнаружения целей, а также оптимизации алгоритмов обработки сигналов.

Задачи:

1. Разработка структурной схемы модели РЛС, включая модули генерации зондирующих сигналов, обработки отражённых сигналов и анализа помех.
2. Создание моделей зондирующего и отражённого сигналов с учётом их временных и спектральных характеристик.
3. Реализация имитационной модели РЛС в среде MATLAB/Simulink с использованием инструментов RF Blockset и Phased Array System.
4. Исследование влияния параметров антенны, фазового шума и других факторов на работу модели.
5. Верификация модели путём сравнения теоретических и практических результатов обработки сигналов.

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Структура модели радиолокационной станции.....	8
1.1 Основные задачи радиолокационных систем	8
1.2 Принципы получения радиолокационной информации.....	9
1.3 Виды радиолокации и классификация РЛС.....	11
1.4 Основные тактико-технические характеристики РЛС	14
1.5 Двухкоординатная РЛС кругового обзора.....	16
Выводы по главе 1	23
Глава 2. Структура модели зондирующего и отраженного от цели сигналов.....	25
2.1 Описание временной структуры зондирующего сигнала.....	25
2.2 Спектр зондирующего сигнала.....	28
Выводы по главе 2.	29
Глава 3. Имитационная модель РЛС	31
3.1 Архитектура Системы	31
3.2 Запуск примера с использованием настроек по умолчанию	33
3.3 Влияние усиления / направления антенны.....	33
3.4 Фазовый шум включен на приемнике LO.....	34
3.5 Влияние фазового шума.....	35
3.6 Структура примера	35
3.7 Генератор радиолокационных импульсов	36
3.8 Подсистема радиочастотного передатчика.....	37
3.9 Цель.....	38
3.10 Радиочастотный приемник	38
3.11 Модуль Rx	39
3.12 Результаты и дисплеи	40
3.13 Моделирование радиочастотного интерфейса при моделировании радиолокационной системы	43
3.14 Моностатический радар с одной целью.....	43
3.15 Оценка дальности действия и скорости радара FMCW.....	45
Выводы по главе 3	46
Заключение.....	47
Список литература	50

Введение

Современные радиолокационные станции (РЛС) продолжают оставаться важнейшим инструментом обеспечения безопасности и эффективности воздушного движения. Их неослабевающая актуальность обусловлена постоянным совершенствованием технологий и расширением функциональных возможностей. В настоящее время можно выделить несколько ключевых направлений развития радиолокационных систем:

Внедрение технологий искусственного интеллекта, позволяющее значительно повысить точность измерений, скорость обработки данных и энергоэффективность оборудования. Интеллектуальные РЛС способны к автономному анализу радиолокационной информации, что существенно улучшает качество управления воздушным движением.

Комплексная интеграция с различными навигационными системами, включая спутниковые навигационные комплексы, инерциальные системы и автоматизированные системы управления полетами. Такая интеграция обеспечивает более точное определение координат воздушных судов и снижает рабочую нагрузку на экипаж.

Разработка помехоустойчивых систем, способных надежно обнаруживать и сопровождать воздушные цели в условиях интенсивного радиоэлектронного противодействия, что существенно повышает безопасность полетов.

Создание мобильных радиолокационных комплексов с активными фазированными антенными решетками, обеспечивающих эффективное обнаружение беспилотных летательных аппаратов на больших дистанциях в любых погодных условиях.

Сложность обработки информации в современных обзорных РЛС, включающей множество взаимосвязанных подсистем и специализированных алгоритмов, делает аналитическое описание таких систем крайне затруднительным. В связи с этим наиболее эффективным инструментом исследования и оптимизации радиолокационных систем становится имитационное моделирование.

Разрабатываемая модель РЛС включает следующие основные функциональные блоки:

- модуль цифровой обработки сигналов;
- подсистемы координатной и траекторной обработки;
- блок моделирования внешней среды.

Для обеспечения адекватности моделирования необходимо учитывать различные внешние факторы, включая движение носителя РЛС, работу антенных систем, перемещение целей и воздействие помех. Модель позволяет комплексно тестировать и оптимизировать алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), первичной (ПОК) и вторичной (ВОК) обработки координат.

Ключевые функциональные возможности модели:

моделирование пространственного расположения целей, помех и отражающих объектов;

генерация моделей сигналов, отраженных от движущихся целей;

имитация процессов цифровой обработки сигналов;

моделирование первичной обработки координат и формирование данных для вторичной обработки;

реализация алгоритмов вторичной обработки;

обработка экспериментальных данных на различных этапах обработки;

генерация платформенно-независимого кода на C/C++ для интеграции с ОСРВ QNX.

Имитационная модель реализована в среде MATLAB/Simulink с возможностью генерации кода на C/C++.

Основные задачи исследования:

1. Разработка структурной схемы модели РЛС
2. Создание моделей зондирующего и отраженного сигналов
3. Реализация имитационной модели РЛС в среде MATLAB

Глава 1. Структура модели радиолокационной станции

1.1 Основные задачи радиолокационных систем

Радиолокация представляет собой метод дистанционного зондирования, основанный на излучении и приеме радиоволн с целью получения информации о пространственном положении и характеристиках различных объектов. В современной практике радиолокационные технологии находят широкое применение в системах воздушного наблюдения, навигации и контроля.

Классификация обнаруживаемых объектов включает четыре основные категории:

1. Воздушные цели (летательные аппараты, включая самолеты, вертолеты и БПЛА)
2. Баллистические объекты (ракетные снаряды и артиллерийские мины)
3. Космические аппараты (искусственные спутники Земли)
4. Наземные и морские объекты (автотранспорт, бронетехника, суда)

Современные радиолокационные станции (РЛС) способны предоставлять три вида принципиально важной информации:

- Факт наличия или отсутствия объекта в зоне контроля
- Точные пространственные координаты и параметры движения
- Классификационные признаки обнаруженного объекта

Важной особенностью РЛС является их исключительная чувствительность. Современные системы способны детектировать сигналы чрезвычайно малой мощности (порядка 10^{-16} - 10^{-19} Вт), что позволяет обнаруживать объекты на значительных расстояниях даже при слабом отраженном сигнале.

При работе радиолокационные системы сталкиваются с различными типами помех:

1. Активные помехи (преднамеренные радиопомехи)
2. Пассивные помехи (отражения от местных предметов)

3. Атмосферные и космические помехи
4. Техногенные помехи (радиоизлучения техники)

Основные функциональные задачи радиолокации включают:

1. Обнаружение целей, определение наличия объектов в заданном секторе пространства с заданной вероятностью правильного обнаружения.
2. Измерение параметров:

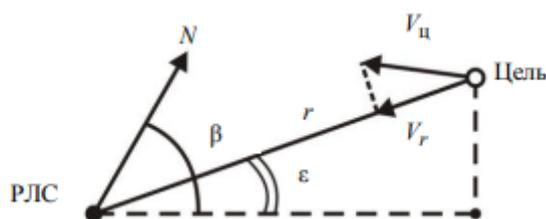


Рисунок 1 Пояснения к измерению координат и параметров движения цели

- В сферической системе координат:
 - -дальность ($r(t)$);
 - -азимут ($\beta(t)$);
 - -угол места ($\epsilon(t)$);
 - -радиальная скорость (V_r).
 - В декартовой системе координат:
 - Пространственные координаты (X, Y, Z)
 - Составляющие вектора скорости
3. Идентификация целей, определение типа и класса обнаруженного объекта по совокупности радиолокационных признаков.

Совокупность этих функций составляет процесс радиолокационного наблюдения. Современные РЛС обеспечивают высокую точность измерений даже в условиях интенсивных помех, что делает их незаменимыми в системах контроля воздушного пространства, противовоздушной обороны и гражданской авиации.

1.2 Принципы получения радиолокационной информации

Основой радиолокации является принцип отражения электромагнитных волн от объектов. Радиолокационная станция излучает направленный

зондирующий сигнал, который, достигнув цели, частично отражается и возвращается обратно к приёмнику. По параметрам отражённого сигнала РЛС извлекает информацию о местоположении, движении и характеристиках цели.

Временная задержка — измерение дальности

Время между излучением и приёмом сигнала позволяет определить расстояние до объекта:

$$R=(c\cdot\tau)/2$$

где:

- R — дальность до цели;
- c — скорость света ($\approx 3\cdot 10^8$ м/с);
- τ — время задержки сигнала (секунды).

Зондирующий сигнал отражается от объекта и возвращается с задержкой, пропорциональной его расстоянию. Деление на 2 учитывает, что сигнал прошёл путь туда и обратно.

Амплитудные характеристики — оценка размеров и формы

Амплитуда отражённого сигнала зависит от эффективной отражающей поверхности (ЭОП) цели. Большие или металлические объекты отражают больше энергии. Эти данные позволяют приблизительно судить о размере или типе объекта.

Кроме того, амплитудные изменения сигнала могут использоваться для определения количества и плотности целей (например, при обнаружении групповых объектов).

1.3 Виды радиолокации и классификация РЛС

Радиолокация как область делится на множество подвидов в зависимости от способа излучения, конструкции антенн, способа обработки сигнала и назначения. Соответственно, и радиолокационные станции классифицируются по ряду признаков, отражающих их конструктивные, функциональные и эксплуатационные особенности.

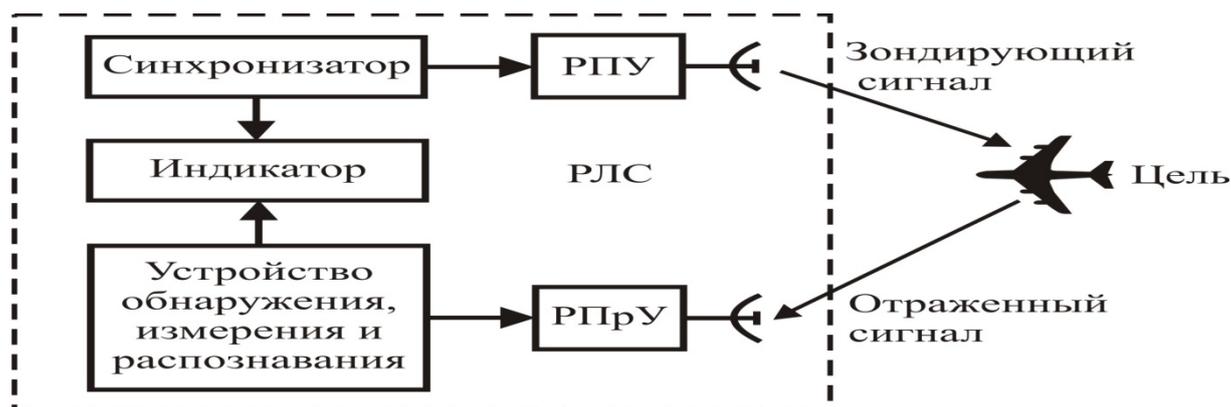


Рисунок 2 Схема активной РЛС с пассивным ответом

Классификация по типу используемого сигнала:

- **Импульсная радиолокация**

Использует короткие радиочастотные импульсы высокой мощности. Это классический и наиболее распространённый тип.

Преимущества: высокая дальность, возможность точного измерения расстояния.

Недостатки: требует сложного приёмно-передающего переключения, чувствительна к флуктуациям сигнала.

Непрерывная радиолокация (CW)

- Передача сигнала осуществляется непрерывно. Применяется чаще всего в доплеровских радарх.
- Преимущества: высокая точность измерения скорости.

- Недостатки: невозможность прямого измерения дальности без модуляции.
- **Модулированная непрерывная радиолокация (FMCW, ЛЧМ)**
Использует линейно-частотно модулированный непрерывный сигнал. Позволяет одновременно измерять дальность и скорость. Часто применяется в автомобильных радарх, РЛС ближнего действия.

Классификация по диапазону радиочастот:

- Низкочастотные (HF, VHF, UHF) – метровый и дециметровый диапазон: высокая дальность, низкая точность.
- Среднечастотные (L, S, C) – сантиметровый диапазон: сбалансированы по дальности и разрешению.
- Высокочастотные (X, Ku, Ka, mmW) – миллиметровый диапазон: высокая точность и разрешение, малый радиус действия.

Частотный диапазон определяет не только дальность и разрешение, но и устойчивость к метеоусловиям и помехам.

По пространственной организации РЛС:

- Моностатическая РЛС — передатчик и приёмник размещены на одной платформе (наиболее распространённый тип).
- Бистатическая РЛС — передатчик и приёмник находятся на расстоянии друг от друга (используется для скрытных наблюдений).
- Многостатическая (сетевые РЛС) — множество пространственно разнесённых приёмников и/или передатчиков.

По типу антенн и способу обзора:

- С механическим сканированием — антенна физически поворачивается для изменения направления луча.

- С электронным сканированием (АФАР) — направление луча управляется фазовой перестройкой в антенне (без механики).
- Синтезированная апертура (SAR) — используется в РЛС для получения изображений с высоким разрешением при движении носителя.

По функциональному назначению:

- Обзорные РЛС (ОПРЛС) — предназначены для широкозонного обнаружения целей.
- Сопровождающие РЛС (САРЛС) — обеспечивают отслеживание координат одной или нескольких целей в режиме реального времени.
- Навигационные РЛС — используются в авиации и судоходстве для картографирования и предотвращения столкновений.
- Метеорологические РЛС — определяют структуру осадков, атмосферные образования.
- Автомобильные РЛС — входят в системы помощи водителю (ADAS), используются для автоматического торможения, контроля полосы и др.
- РЛС с функцией построения изображения (SAR, ISAR) — применяются в разведке, дистанционном зондировании, геологии.

По степени мобильности:

- Стационарные РЛС — размещаются на неподвижных платформах (аэродромах, берегах, зданиях).
- Мобильные РЛС — на автомобилях, кораблях, поездах.
- Воздушные РЛС — на самолётах, вертолётах, беспилотниках.
- Космические РЛС — устанавливаются на спутниках для дистанционного зондирования Земли.

По режиму работы:

- Моноимпульсные РЛС — работают с одним лучом, быстро переключаемым.

- Многолучевые РЛС — одновременное формирование нескольких лучей для одновременного обзора разных направлений.
- РЛС с управляемой апертурой — реализуют сложные методы формирования диаграммы направленности.

1.4 Основные тактико-технические характеристики РЛС

Тактико-технические характеристики (ТТХ) радиолокационной станции отражают её функциональные возможности, производительность и пригодность к использованию в тех или иных условиях. Эти параметры определяются совокупностью инженерных решений, физической природы радиоволн, характеристиками приёмно-передающей аппаратуры и алгоритмами обработки сигналов.

Максимальная дальность обнаружения

Это наибольшее расстояние, на котором РЛС способна обнаружить цель с заданной вероятностью при определённых условиях:

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \right)^{1/4}$$

где:

- P_t — мощность передатчика;
- G — усиление антенны;
- λ — длина волны;
- σ — эффективная отражающая поверхность цели (ЭОП);
- S_{min} — минимальная принимаемая мощность (чувствительность приёмника).

Факторы, влияющие на дальность:

- частотный диапазон (длина волны);
- потери в атмосфере;

- шумовая обстановка;
- характеристики цели (ЭОП).

Чувствительность приёмника

Минимальный уровень мощности, при котором приёмник способен обнаружить сигнал. Чувствительность зависит от:

- собственного шумового коэффициента приёмника;
- полосы пропускания;
- температуры приёмной системы;
- методов обработки сигнала (например, когерентная интеграция).

Чем выше чувствительность, тем больше дальность обнаружения, но возрастает и вероятность ложных срабатываний.

Точность измерений

Способность РЛС измерять координаты объекта с минимальной погрешностью. Зависит от стабильности частоты, точности измерения времени задержки, фазового шума, алгоритмов обработки.

Типовые значения:

- по дальности — до нескольких метров;
- по азимуту — до $0.1-0.5^\circ$;
- по скорости — до 0.1 м/с.

Скорость обзора (обновления информации)

Время, за которое РЛС производит полный обзор заданной зоны пространства.

Зависит от:

- скорости вращения антенны (при механическом сканировании);
- скорости электронного сканирования (в АФАР);

- длительности импульса и межимпульсного интервала.

Чем выше скорость обзора, тем быстрее РЛС реагирует на изменение обстановки, но ниже точность.

Энергетический потенциал РЛС

Показатель, определяющий способность РЛС обеспечивать заданную дальность и вероятность обнаружения. Зависит от:

- мощности передатчика;
- усиления антенны;
- эффективности обработки сигналов;
- уровня помех.

Иногда выражается через энергетическую освещённость цели — мощность сигнала, приходящего на единицу площади цели.

Устойчивость к помехам

Способность РЛС обнаруживать цели при наличии внешних или внутренних помех:

- пассивные (отражения от земли, облаков);
- активные (намеренные помехи);
- собственные шумы оборудования

Повышается за счёт адаптивной фильтрации, частотного маневрирования, пространственной селекции (антиджаммерные методы).

1.5 Двухкоординатная РЛС кругового обзора

Двухкоординатная радиолокационная станция (РЛС) кругового обзора — это тип РЛС, обеспечивающий измерение двух координат цели: дальности и азимута. Такие станции выполняют непрерывный обзор окружающего

пространства в горизонтальной плоскости и используются для обнаружения, отслеживания и передачи информации о воздушных, морских и наземных объектах. Функциональная схема импульсной РЛС кругового обзора представлена на рисунке 3

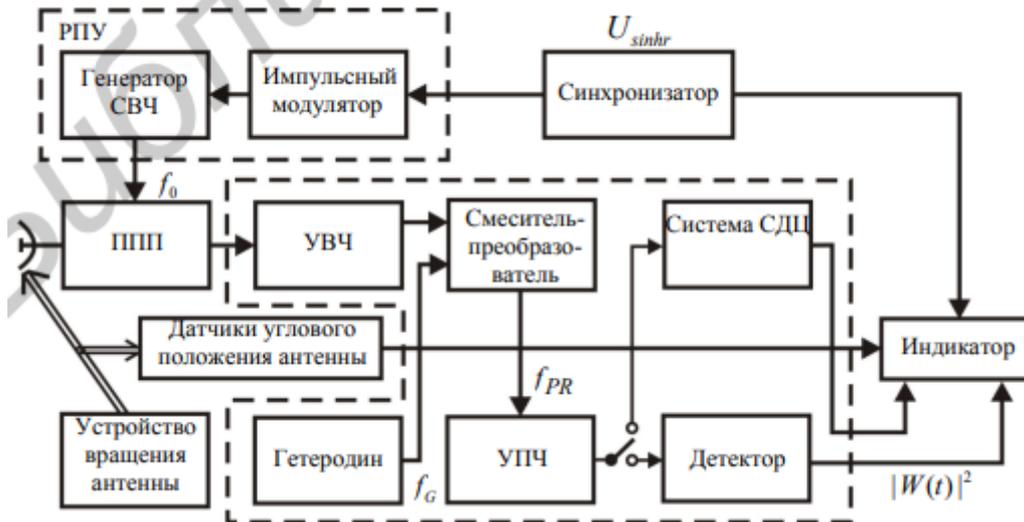


Рисунок 3 Функциональная схема РЛС кругового обзора

В радиолокационных станциях кругового обзора в качестве зондирующего сигнала обычно применяется последовательность прямоугольных радиоимпульсов. Эти импульсы характеризуются следующими параметрами:

1. Длительность импульса (T_0) существенно меньше периода их повторения (T_r)
2. Формирование сигнала осуществляется СВЧ-генератором, активируемым модулирующими видеоимпульсами $U_a(t)$
3. Рабочая частота находится в сантиметровом или дециметровом диапазоне (сотни-тысячи МГц)

Особенностью такого импульсного зондирования является возможность использования единой антенной системы как для передачи, так и для приема сигналов. Это достигается за счет временного разделения процессов излучения и приема.

При выборе периода повторения импульсов T_r учитывается требование обеспечения однозначного измерения дальности в пределах заданной

максимальной дальности обнаружения r_{max} . Данное условие определяется необходимостью исключения неоднозначности при измерении расстояний до целей.

$$T_r > \frac{= 2r_{max}}{c}$$

Импульсы синхронизации, модулирующие видеоимпульсы РПУ, и квадратурная составляющая зондирующего сигнала имеют вид, представленный на рисунке 4.

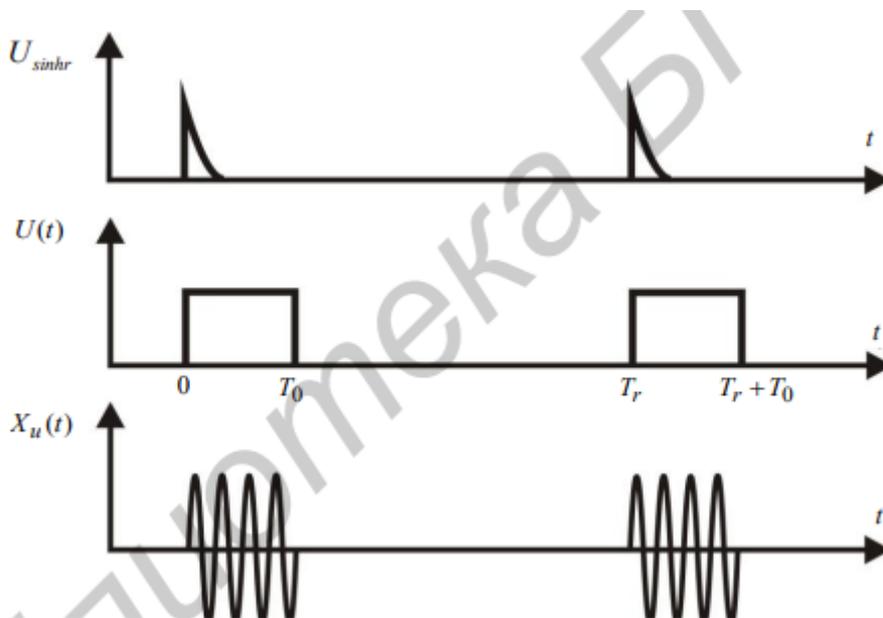


Рисунок 4 Импульсы синхронизации, модулирующие видеоимпульсы РПУ

В процессе работы радиолокационной станции ключевую роль играет переключатель приема/передачи (ППП), который выполняет следующие функции:

1. Фаза передачи:

- При формировании зондирующего импульса ППП подключает выход радиопередающего устройства (РПУ) к антенне
- Сгенерированный радиоимпульс излучается в пространство

2. Фаза приема:

- После излучения ППП переключает антенну на вход радиоприемного устройства (РПрУ)

- Принятый отраженный сигнал проходит многоступенчатую обработку:
 - Усиление на высокой частоте (в УВЧ)
 - Преобразование на промежуточную частоту ($f_{pr} = f_c - f_0$), обычно составляющую десятки мегагерц
 - Дальнейшее усиление и обработка в УПЧ
 - Выделение квадрата огибающей сигнала ($|W(t)|^2$) с помощью детектора

Особенности обработки сигнала:

- Принятый сигнал всегда содержит помехи различного происхождения
- В УПЧ осуществляется спектральная селекция, для чего:
 - Частотная характеристика УПЧ согласуется со спектром отраженного сигнала
 - Ширина полосы пропускания выбирается приблизительно равной ширине спектра полезного сигнала

Система обеспечивает:

1. Подавление активных шумовых помех (АШП) за счет спектральной селекции
2. Компенсацию пассивных помех с помощью системы селекции движущихся целей (СДЦ), основанной на когерентной обработке сигналов

Данная архитектура позволяет эффективно выделять полезный сигнал на фоне различных типов помех, обеспечивая надежное обнаружение целей.

Измерение дальности сводится к измерению в каждом периоде повторения времени запаздывания t_r отраженных радиоимпульсов относительно зондирующих. При этом

$$r_t = \frac{c \times t_r}{2}$$

Изобразим это на временных диаграммах, представленных на рисунке 5

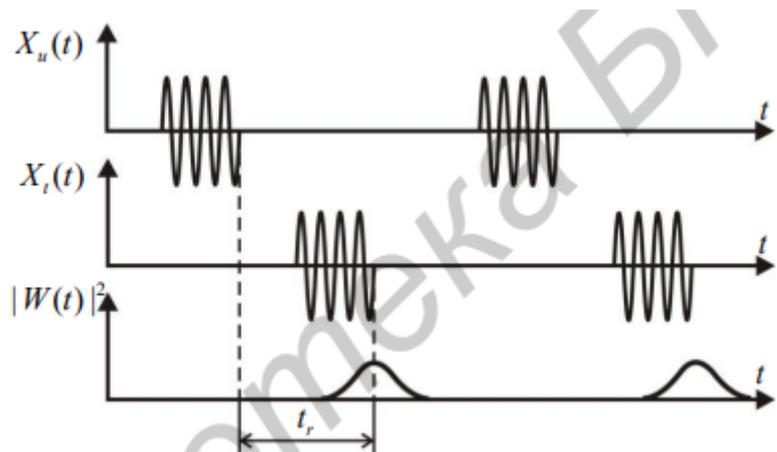


Рисунок 5 Временные диаграммы, поясняющие измерение дальности до цели

Обнаружение целей и измерение осуществляется оператором с помощью индикатора, например, с линейной разверткой. Схема такого индикатора, называемого индикатором дальности, представлена на рисунке 6, а временные диаграммы, поясняющие принцип его работы – на рисунке 7.

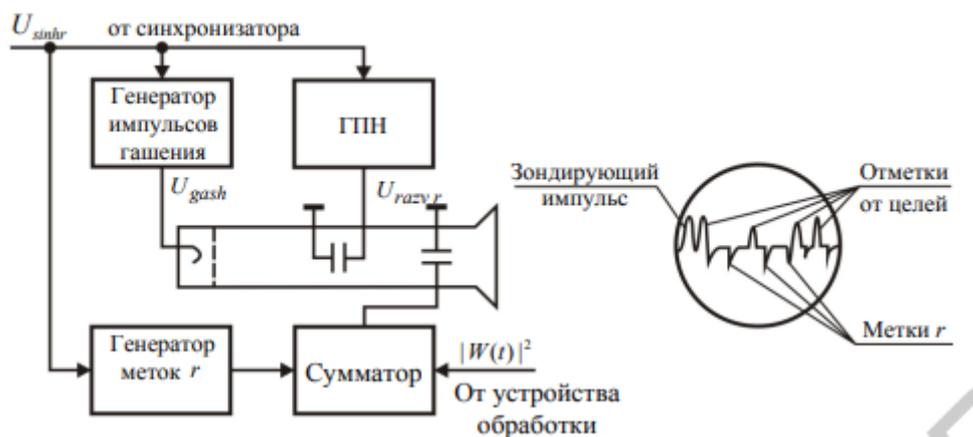


Рисунок 6 Схема индикатора дальности с линейной разверткой

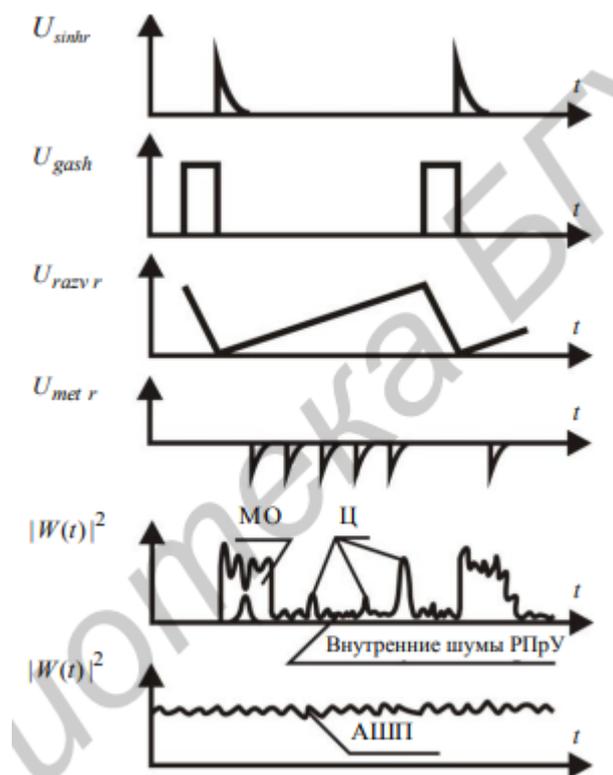


Рисунок 7 Временные диаграммы, поясняющие принцип работы индикатора дальности

Принцип работы индикатора дальности в радиолокационной системе основан на строгой временной привязке к моменту излучения зондирующего сигнала. Развертка луча начинается сразу после окончания передачи радиоимпульса, создавая временную шкалу, вдоль которой отображаются все принимаемые отражения. Положение каждой отметки на этой шкале напрямую зависит от времени, прошедшего с момента излучения до приема отраженного сигнала, что позволяет точно определять расстояние до обнаруженных объектов.

Для удобства интерпретации данных развертка снабжается градуировкой в виде электронных меток или графической шкалы, которые помогают оператору быстро оценивать дальность до целей. При этом амплитуда отклонения луча от нулевой линии несет информацию о мощности принятого отраженного сигнала - чем сильнее отражение от цели, тем более выраженной будет соответствующая отметка на экране индикатора. Такой подход обеспечивает наглядное представление как пространственного положения объектов, так и их радиолокационной заметности, позволяя оператору комплексно оценивать обстановку в зоне обзора.

Тактико-технические характеристики РЛС кругового обзора

Радиолокационные станции кругового обзора обладают следующими ключевыми характеристиками:

Зона действия

Радиус действия станции определяется двумя параметрами:

- Минимальная дальность зависит от длительности зондирующего импульса (T_0) и времени восстановления системы (t_v), рассчитывается по формуле:

$$r_{\min} = c (T_0 + t_v)/2,$$

где c - скорость света

- Максимальная дальность может достигать сотен километров

В угловом измерении:

- По азимуту обеспечивается полный круговой обзор (360°)
- По углу места зона обзора ограничивается шириной диаграммы направленности антенны (ДНА)

Измеряемые координаты и точность

Основные измеряемые параметры:

- Дальность до цели
- Азимутальный угол

Точность измерений:

- Погрешность определения азимута составляет доли ширины ДНА
- Ошибка измерения дальности зависит от:
 - Длительности зондирующего импульса (T_0)
 - Толщины пятна луча развертки индикатора (δ)

Разрешающая способность

Способность различать близко расположенные цели определяется:

- По азимуту - шириной ДНА антенны
- По дальности - вычисляется по формуле:

$$\delta_r = cT_0/2 + (r_p/L) \delta$$

где:

r_p - максимальная отображаемая дальность

L_p - длина развертки дальности

Эти характеристики определяют основные эксплуатационные возможности радиолокационной станции, включая дальность обнаружения целей, точность определения их координат и способность различать близко расположенные объекты.

Выводы по главе 1

1. Радиолокация представляет собой технологию, основанную на использовании электромагнитных волн для обнаружения объектов, их идентификации и определения координат на значительном удалении.
2. Принцип действия РЛС заключается в следующем: передающее устройство станции формирует колебания высокой частоты заданной формы и излучает их в пространство в виде узконаправленного луча, совершающего круговое вращение по азимуту. Отражённые от объектов волны в виде эхо-сигналов принимаются антенной и отображаются на экране индикатора.
3. Модель радиолокационной станции должна обеспечивать возможность выполнения первичной и вторичной обработки информации.
 - Первичная обработка информации (ПОИ) направлена на выявление полезного сигнала в условиях помех, принятие решения о наличии цели и определение её координат. Эта обработка выполняется в рамках одного обзора пространства РЛС.
 - Вторичная обработка информации (ВОИ) включает формирование маршрута (трассы) движения цели на основе данных одного источника информации. Траектория строится с применением координат и характеристик цели, полученных за несколько обзоров. По результатам двух-трёх обновлений рассчитываются направление движения и составляющие

скорости, а также прогнозируется положение цели в следующем цикле обзора для продолжения её сопровождения.

- Третичная обработка информации (ТОИ) заключается в объединении данных от различных источников, что позволяет создать единую картину воздушной обстановки при наличии сообщений об одних и тех же целях.

Таким образом, ПОИ обеспечивает определение координат цели, ВОИ — восстановление траектории её перемещения, а ТОИ — интеграцию информации с целью повышения точности и полноты представления обстановки.

4. Постановщики активных помех (ПАП) представляют собой серьёзную угрозу для функционирования РЛС. Одним из способов их нейтрализации является определение их углового положения (пеленгование) с последующим поражением средствами вооружения.

В зависимости от способа воздействия на РЛС, ПАП делятся на маскирующие (МАП), предназначенные для сокрытия цели, и имитирующие (ИАП), создающие ложные сигналы. Кроме того, по характеру спектра и направленности излучения ПАП классифицируются на прицельные, воздействующие на конкретные частоты и направления, и заградительные, создающие широкополосные или направленные помехи.

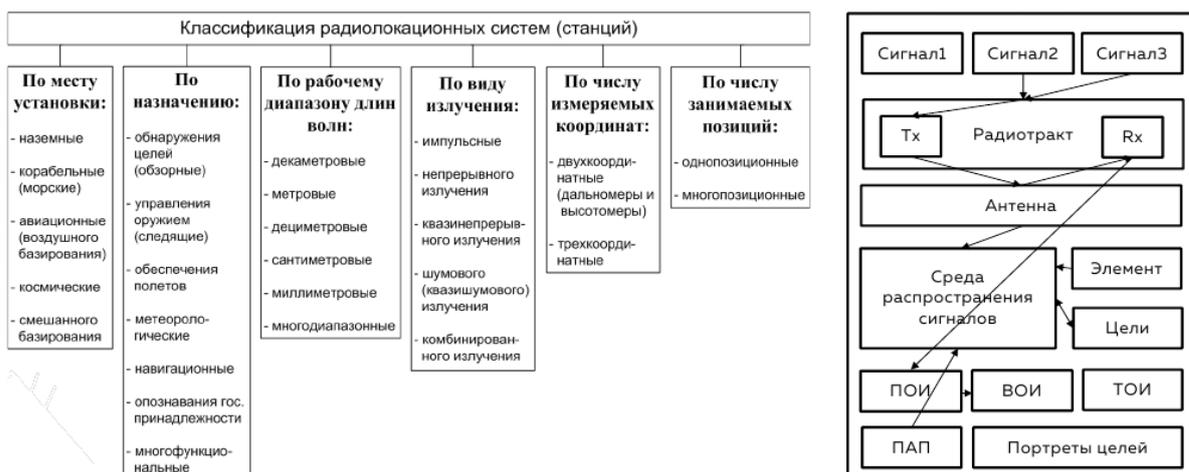


Рисунок 8 Классификация РЛС (слева) и структурная схема РЛС (справа): Tx – передатчик, Rx – приемник; ПОИ – первичная обработка информации; ВОИ – вторичная обработка информации; ТОИ – третичная обработка информации

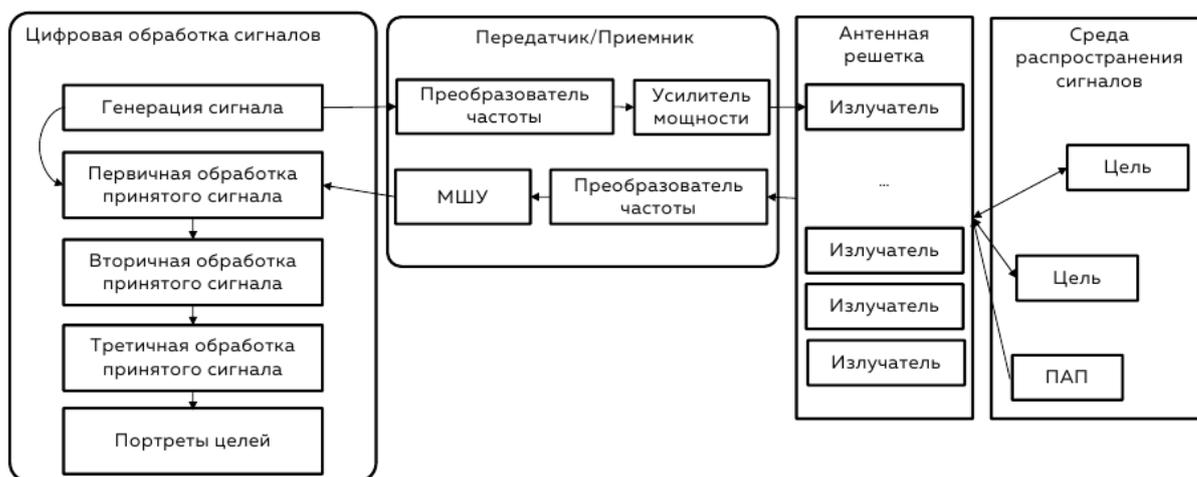


Рисунок 9 Структура модели РЛС; МШУ – малошумящий усилитель

Глава 2. Структура модели зондирующего и отраженного от цели сигналов

2.1 Описание временной структуры зондирующего сигнала

С точки зрения математического моделирования, временная структура зондирующего сигнала (ЗС) может быть представлена в комплексной форме, содержащей вещественную и мнимую компоненты:

$$u(t) = E_0 U(t) e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)} = x_u(t) + iy_u(t)$$

В данном представлении:

- ω_0 – несущая частота;
- E_0 – амплитуда;
- φ_0 – начальная фаза;
- $x_u(t)$ и $y_u(t)$ – реальная и мнимая квадратурные составляющие ЗС;

- $U(t)$ обозначает комплексную огибающую, описывающую модуляционные свойства сигнала.

Комплексная огибающая раскладывается на составляющие:

$$U(t) = U_a(t)e^{i\psi(t)} = x_U(t) + iy_U(t)$$

где:

- $U_a(t)$ отражает амплитудную модуляционную характеристику;
- $\psi(t) = \arg U(t)$ описывает фазовую модуляцию сигнала.

Существует фундаментальная взаимосвязь между фазовой и частотной модуляциями, выражаемая следующими соотношениями:

1. Частотная модуляция определяется как производная по времени от фазовой:

$$\vartheta(t) = \frac{\delta\psi(t)}{\delta t}$$

2. Фазовая модуляция может быть получена интегрированием частотной характеристики:

$$\psi(t) = \int_0^t \vartheta(x) dx$$

Приведенные математические соотношения дают полное аналитическое описание временных характеристик зондирующего сигнала, включая его амплитудные, фазовые и частотные параметры, что составляет теоретическую основу для проектирования и анализа радиолокационных систем.

Геометрически ЗС можно интерпретировать в виде вращающегося вектора (рисунок 10).

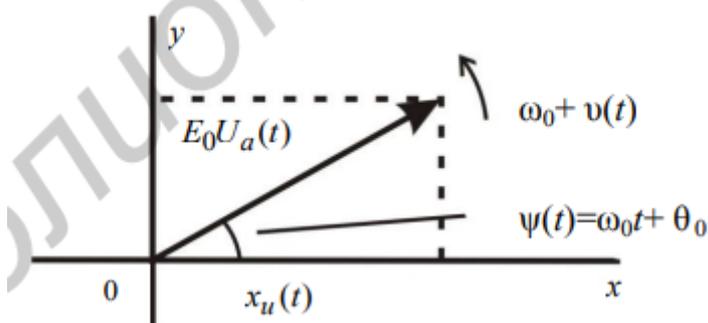


Рисунок 10 Геометрическая интерпретация ЗС

Во время лабораторных работ и практической работы на РЛС можно наблюдать только квадратурные составляющие сигнала, например, для простого прямоугольного радиоимпульса (ПРИ) (рисунок 11):

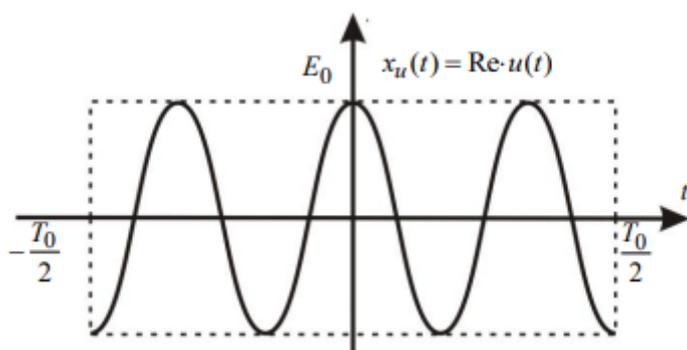


Рисунок 11 Квадратурная составляющая ПРИ

Ключевым параметром зондирующего сигнала является его эффективная длительность. Под этим понятием подразумевается длительность эквивалентного прямоугольного радиоимпульса, обладающего такими же значениями амплитуды и энергии, как и анализируемый сигнал:

$$T_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt}{|u(t)|_{\max}^2} = \int_{-\infty}^{\infty} |U(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} U_a^2(t) dt$$

При этом принимается, что максимальное значение амплитуды $|U(t)|_{\max} = U_{a,\max} = 1$. Геометрически это можно представить следующим образом: если построить график квадрата амплитудного закона модуляции, то T_0 будет соответствовать основанию прямоугольника, площадь которого равна площади под кривой, а высота принимается равной единице (рисунок 12).

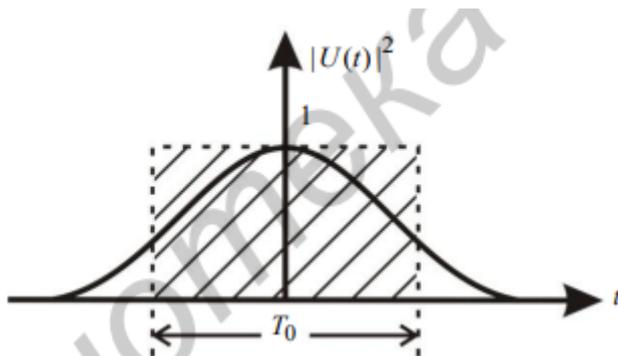


Рисунок 12 Геометрическая интерпретация эффективной длительности импульса

Мгновенная мощность зондирующего сигнала в нагрузке сопротивлением 1 Ом определяется выражением:

$$P(t) = \frac{1}{2} |u(t)|^2 = \frac{1}{2} E_0^2 |U(t)|^2$$

Средняя мощность одиночного зондирующего сигнала в той же нагрузке рассчитывается как:

$$P_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} E_0^2 |U(t)|^2 dt = \frac{E_0^2}{2T_0} \int_{-\infty}^{\infty} |U(t)|^2 dt = \frac{E_0^2}{2}$$

Энергия одиночного зондирующего сигнала, выделяемая в нагрузке 1 Ом, вычисляется по формуле:

$$E_0 = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt = P_0 T_0$$

Эти соотношения позволяют количественно оценить энергетические характеристики зондирующего сигнала, что является важным для анализа и проектирования радиолокационных систем.

2.2 Спектр зондирующего сигнала

Амплитудно-фазочастотный спектр (АФЧС) сигнала представляет собой распределение по частоте комплексных амплитуд гармонических колебаний, на которые может быть разложен сигнал. Временная структура сигнала и его спектр связаны друг с другом парой преобразований Фурье:

- прямым:

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-i\omega t} dt = E_0 e^{i\varphi_0} G(\omega - \omega_0)$$

где $G(\omega)$ – АФЧС закона модуляции

- обратным:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

Соответственно,

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

Следует особо отметить важные особенности записи прямого и обратного преобразований Фурье:

Временные и частотные зависимости:

- При вычислении спектра (частотной функции) интегрирование выполняется по временной переменной
- Для обратного преобразования - интегрирование ведется по частотной переменной

Знаковые особенности:

- В прямом преобразовании перед мнимой единицей в экспоненциальном множителе используется знак "минус"
- В обратном преобразовании - знак "плюс"

Коэффициент нормировки:

- Обратное преобразование содержит множитель $1/(2\pi)$

Особое внимание необходимо уделять точности записи этих преобразований, учитывая их широкое применение в анализе сигналов.

Особенности представления спектральных характеристик

Комплексное представление амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧС) неудобно для графического отображения. Поэтому принято рассматривать отдельно:

Амплитудно-частотный спектр (АЧС) - модуль комплексного спектра:

$$|g(\omega)| = E_0 |G(\omega - \omega_0)|$$

Фазочастотный спектр (ФЧС) - аргумент комплексного спектра:

$$\arg g(\omega) = \varphi_0 + \arg G(\omega - \omega_0)$$

Графическое представление амплитудно-частотного спектра зондирующего сигнала и соответствующего закона модуляции приведено на рисунке 13.

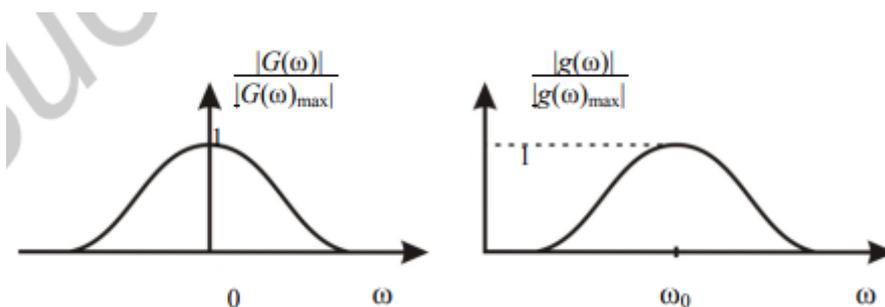


Рисунок 13 АЧС ЗС и закон его модуляции

Выводы по главе 2.

В радиолокационных станциях (РЛС) зондирующий сигнал представляет собой электромагнитное излучение, генерируемое передающим устройством и излучаемое антенной системой в исследуемое пространство. Характеристики этого сигнала, в частности его временная структура и длительность (варьирующаяся от 0,01 микросекунды до 1 миллисекунды), определяются функциональным назначением конкретной радиолокационной системы.

Современные радиолокационные технологии используют разнообразные типы зондирующих сигналов - от элементарных радиоимпульсных

последовательностей до сложных составных сигналов с кодовым разделением в частотно-временной области. Основным принцип радиолокационного измерения расстояния основан на определении временного интервала между моментом излучения зондирующего сигнала и моментом приема его отражения от объекта (эхо-сигнала).

Классификация зондирующих сигналов по временным характеристикам:

1. **Импульсные сигналы** - последовательности радиоимпульсов, где длительность отдельного импульса существенно меньше периода их повторения.
2. **Квазинепрерывные сигналы** - последовательности радиоимпульсов, длительность которых сопоставима с периодом повторения.
3. **Непрерывные сигналы** - последовательности радиоимпульсов без временных промежутков между ними, где длительность сигнала равна периоду повторения.

Классификация по видам модуляции:

1. **Простые прямоугольные радиоимпульсы** - импульсы с немодулированной несущей частотой.
2. **ЛЧМ-импульсы** - радиоимпульсы с линейной частотной модуляцией несущего колебания в пределах длительности импульса.
3. **КФМ-импульсы** - радиоимпульсы с фазовой манипуляцией несущего колебания по определенному коду.
4. **Другие виды модуляции** - включая дискретную частотную модуляцию, которая может применяться как внутри отдельного импульса, так и осуществляться от импульса к импульсу в последовательности.

Данная классификация отражает основные подходы к формированию зондирующих сигналов в современных радиолокационных системах, каждый из которых обладает специфическими преимуществами для различных условий и задач радиолокационного наблюдения.

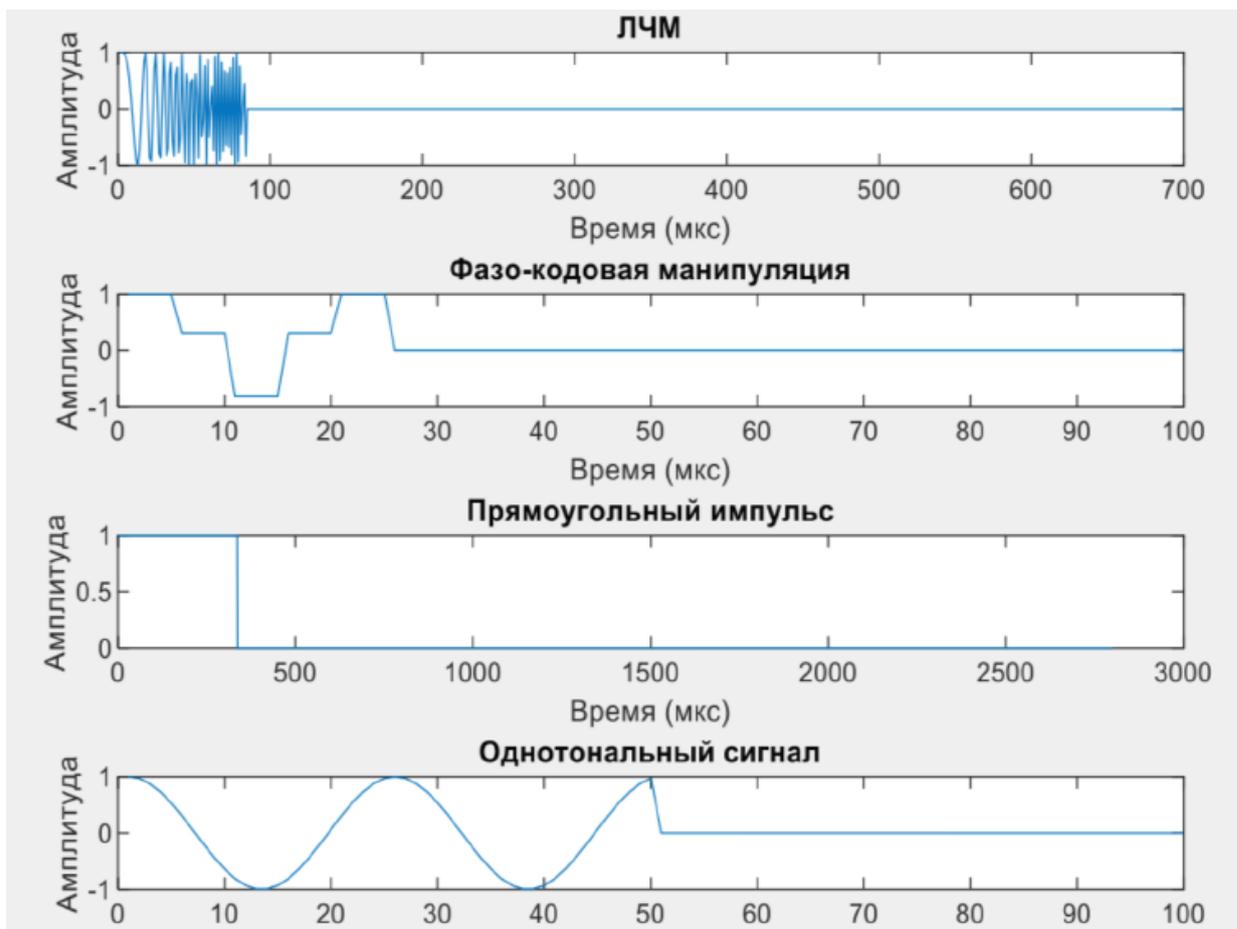


Рисунок 14 Некоторые виды зондирующих сигналов РЛС. ЛЧМ – линейночастотномодулированный сигнал

Глава 3. Имитационная модель РЛС

3.1 Архитектура Системы

Система включает в себя несколько ключевых компонентов, обеспечивающих моделирование радиолокационной системы. Генератор радиолокационных импульсов формирует сигналы мощностью 1 МВт с рабочим циклом 2%, где длительность импульса составляет 2 мс, а период повторения — 100 мс.

Радиочастотный передатчик состоит из фильтра и усилителя, созданных на основе библиотеки огибающих схем RF Blockset. Фильтр, являясь линейным устройством, и усилитель, обладающий нелинейными характеристиками, разделены на независимые подсистемы. Это разделение позволяет применять различные частотные настройки для каждой подсистемы, что способствует оптимизации скорости моделирования, хотя и исключает эффекты межступенчатого взаимодействия, характерные для каскадных структур.

Антенный элемент, работающий на частоте 2,1 ГГц, обладает заданным коэффициентом усиления в зоне обзора. Модель движущейся цели полностью отражает падающий радиолокационный сигнал от своей поверхности, которая расположена перпендикулярно направлению движения импульса.

Приемная часть системы построена с использованием библиотеки огибающих RF Blockset и реализует схему прямого преобразования. Она включает малошумящий усилитель (LNA), описанный в файле Touchstone, согласующие сети и гетеродин с моделью фазового шума. Как и в передатчике, приемник разделен на линейную и нелинейную подсистемы: линейная часть содержит согласующие цепи, LNA и фильтр, а нелинейная — смеситель и усилители выходного каскада.

Приемный модуль выполняет две основные функции. Во-первых, он оснащен согласованным детектором и фильтром для обнаружения цели. Во-вторых, он служит платформой для тестирования, где сравниваются результаты теоретической и практической реализации фильтров, созданных в Simulink. Различия между их выходными сигналами отображаются на графиках для анализа.

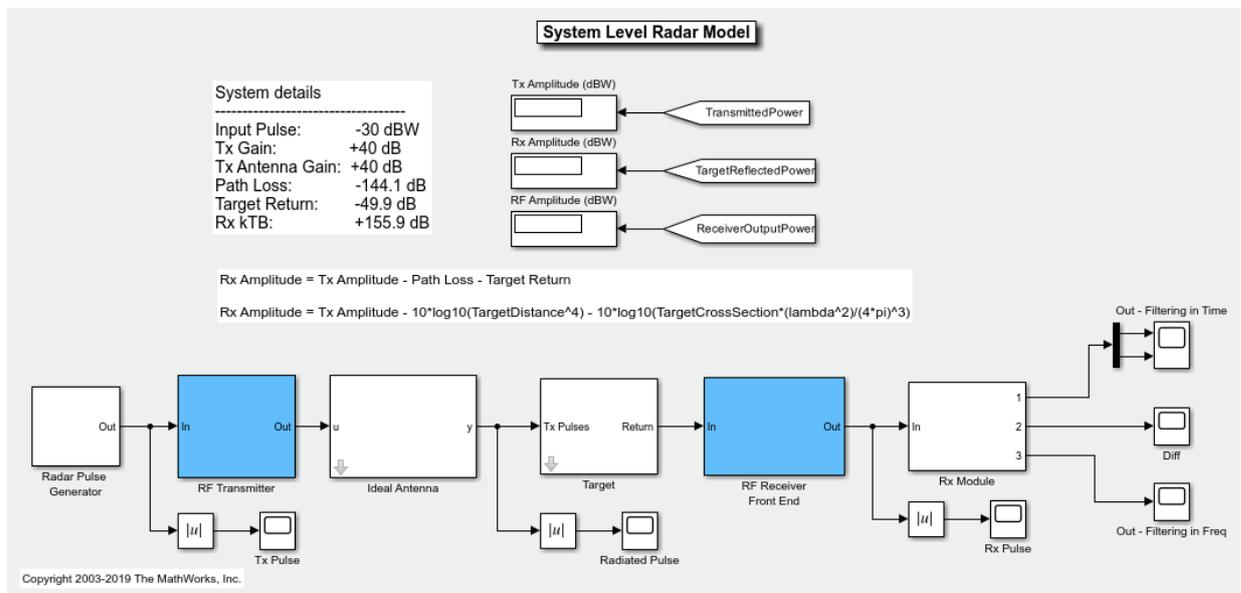


Рисунок 15 Архитектура системы

3.2 Запуск примера с использованием настроек по умолчанию

Для настройки параметров цели необходимо дважды кликнуть на её значок и задать значения эффективной площади рассеяния, скорости движения и дистанции до объекта. При значительном удалении цели или малой величине её отражающей поверхности отражённый сигнал может оказаться ниже уровня шумов и остаться незамеченным.

Запуск процесса моделирования осуществляется через меню "Моделирование" выбором пункта "Выполнить". В результате на экране отображаются данные полусекундного цикла работы системы, где зафиксированные импульсы свидетельствуют о наличии цели в зоне обзора.

3.3 Влияние усиления / направления антенны

Для изменения характеристик антенны необходимо открыть соответствующий блок "Идеальная антенна" и установить значение коэффициента усиления передачи равным 10 дБ. При такой настройке цель перестанет находиться в зоне действия основного лепестка диаграммы направленности антенны передатчика.

После внесения указанных изменений можно приступить к выполнению моделирования системы. Для этого следует запустить процесс симуляции стандартным способом через интерфейс программы.

1. Выберите **Моделирование> Выполнить**

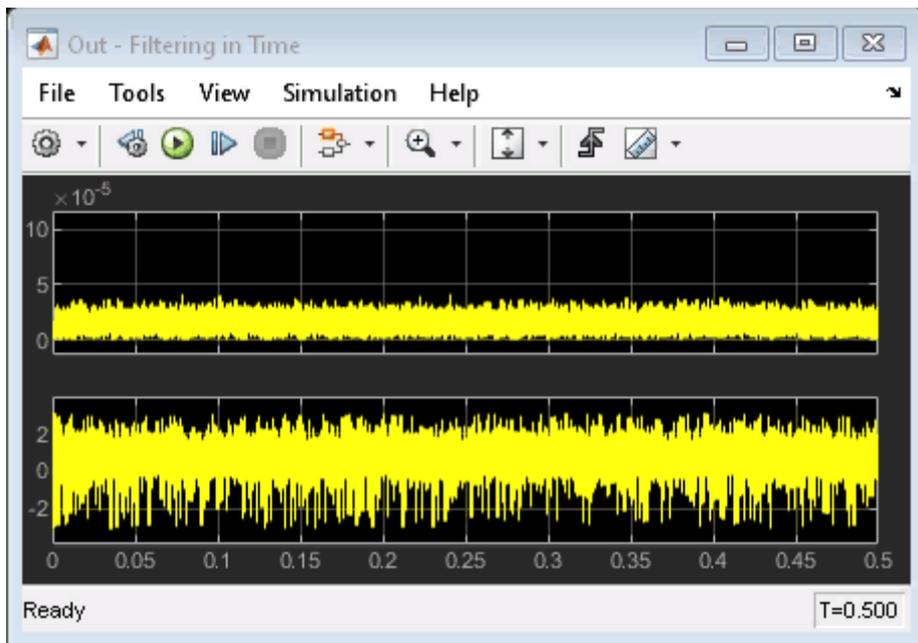


Рисунок 16 Эффект изменения усиления антенны

Эффект изменения усиления антенны виден в оптическом прицеле. Обратите внимание, что импульсы теперь скрыты в шуме, делая объект электромагнитно невидимым.

3.4 Фазовый шум включен на приемнике LO

Откройте интерфейсную подсистему приемника и с помощью ручного переключателя включите модель фазового шума для гетеродина.

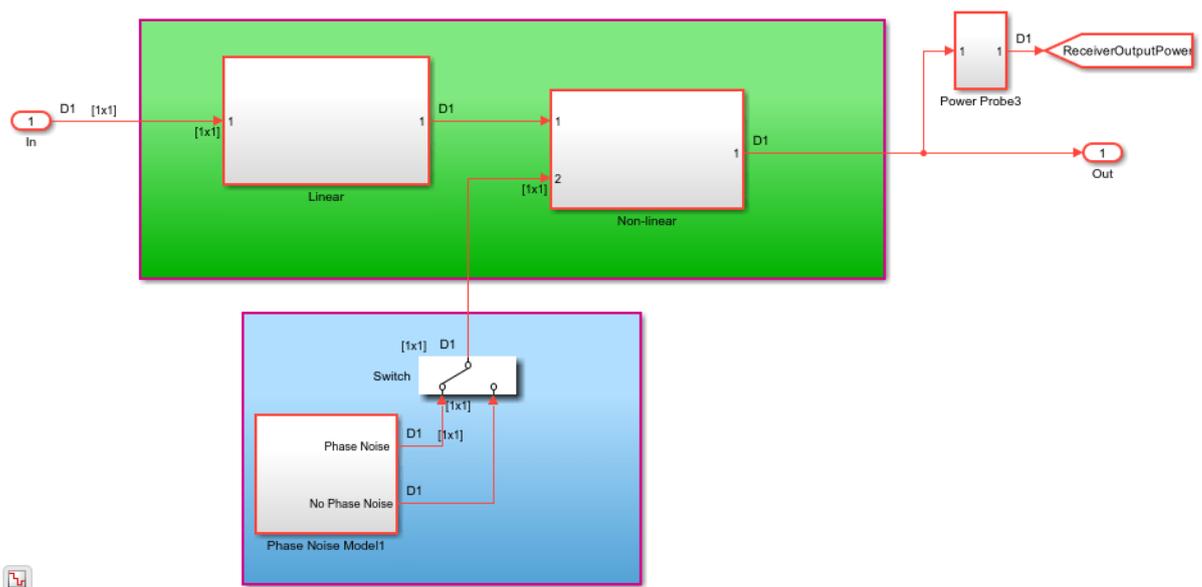


Рисунок 17 модель фазового шума для гетеродина

3.5 Влияние фазового шума

1. Дважды щелкните по блоку "Идеальная антенна" и измените коэффициент усиления передачи обратно на 40 дБ.
2. Выберите **Моделирование**> **Выполнить**

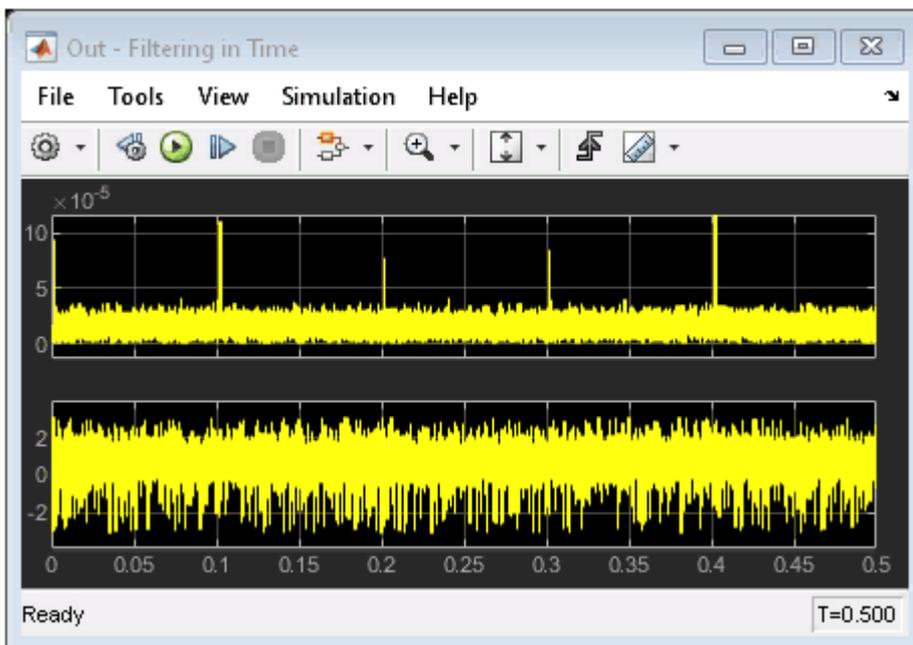


Рисунок 18 Влияние фазового шума от гетеродина

Фазовый шум гетеродина оказывает существенное влияние на характеристики принимаемых сигналов, вызывая флуктуации амплитуды регистрируемых импульсов. Такая нестабильность параметров отраженных сигналов снижает надежность обнаружения, делая возможным определение цели лишь в отдельные моменты времени, когда соотношение сигнал-шум достигает достаточного уровня.

3.6 Структура примера

Представленная модель включает комплекс подсистем, воспроизводящих ключевые функциональные элементы радиолокационной установки. Данная конфигурация характерна для типовых радиолокационных систем, предназначенных для измерения координат и скорости воздушных объектов. В состав модели входят: импульсный генератор зондирующих сигналов, высокочастотный передающий тракт, имитатор подвижной цели,

реализованный средствами Simulink, приемное радиочастотное устройство и специализированный модуль обработки принимаемых сигналов.

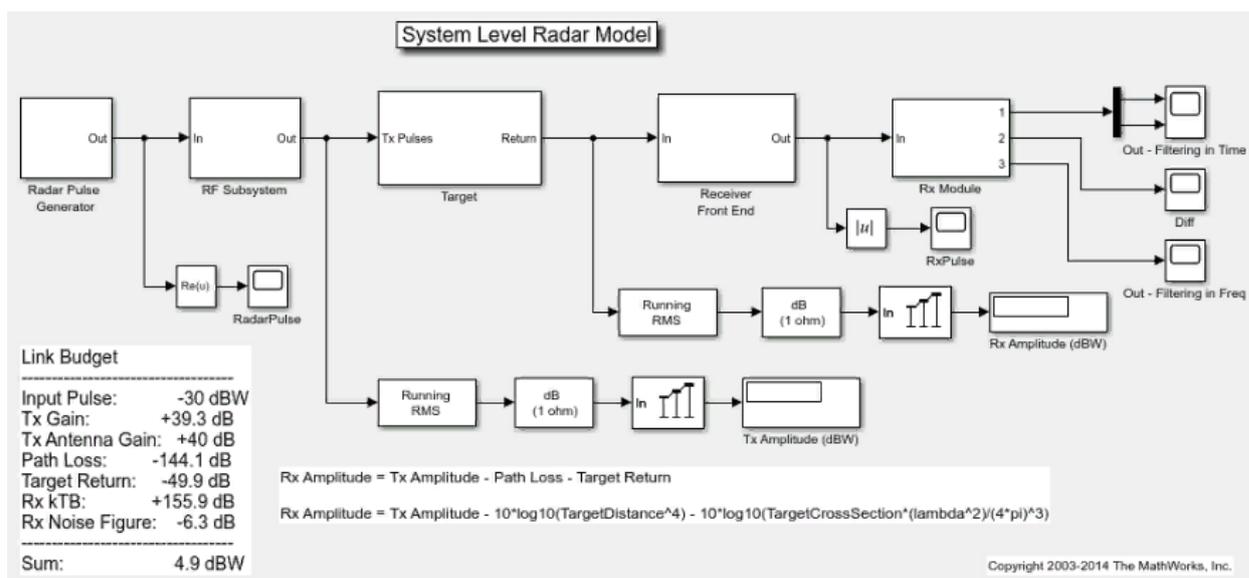


Рисунок 19 пример подсистемы, моделирующей основные характеристики радиолокационной системы

3.7 Генератор радиолокационных импульсов

Радарный импульсный генератор формирует частотно-модулированный сигнал (линейно-частотную модуляцию) с рабочим циклом 10%. Данная подсистема разработана на основе стандартных блоков Simulink®, а в качестве исходного сигнала используется чирп-волна, загружаемая непосредственно из рабочего пространства MATLAB.

Такой подход позволяет гибко настраивать параметры генерируемого сигнала, включая его длительность, частотную полосу и другие характеристики, что особенно важно для моделирования различных сценариев работы радиолокационной системы. Использование готового чирп-сигнала из MATLAB обеспечивает точное соответствие заданным параметрам и упрощает процесс конфигурации модели.

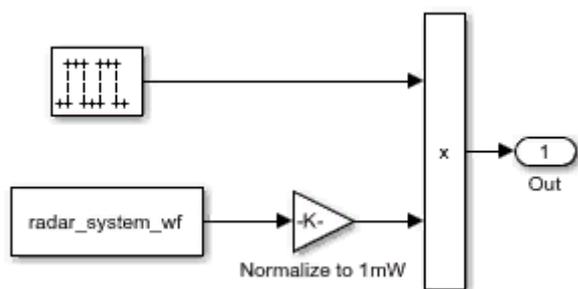


Рисунок 20 генератор радиолокационных импульсов

3.8 Подсистема радиочастотного передатчика

Конструкция данной подсистемы сочетает стандартные элементы Simulink с компонентами из библиотеки базовых частот RF Blockset. В частности, усилительный каскад выполнен на основе модели лампы бегущей волны из RF Blockset, что обеспечивает точное воспроизведение характеристик реального радиочастотного тракта. Моделирование антенны осуществляется через специализированный блок усиления в Simulink, позволяющий задавать ключевые параметры излучающего элемента.

Для анализа мощности сигналов основной полосы частот в подсистеме задействованы вычислительные блоки из DSP System Toolbox. Такое комбинированное использование различных инструментов моделирования позволяет достичь высокой точности при воспроизведении работы радиолокационного передатчика, сочетая при этом относительную простоту реализации с достоверностью получаемых результатов. Особенностью архитектуры является возможность отдельной настройки параметров каждого функционального блока, что обеспечивает гибкость при исследовании различных режимов работы системы.

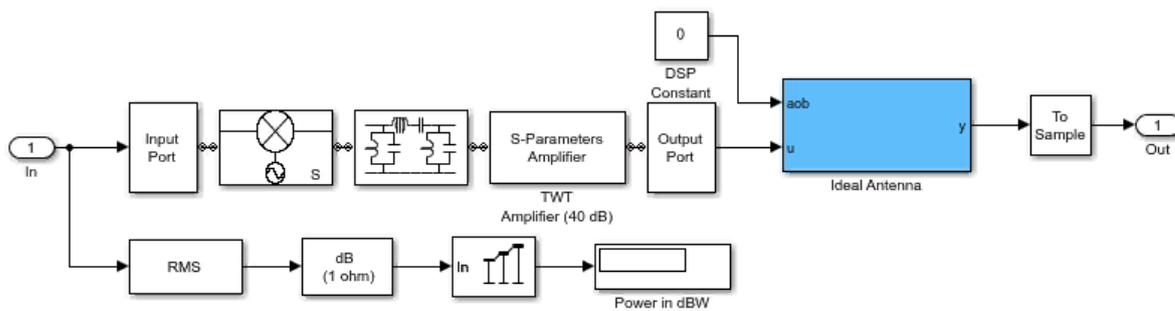


Рисунок 21 подсистема радиочастотного передатчика

3.9 Цель

Модель цели построена на основе теоретических расчетов, имитируя объект с идеальными отражающими свойствами. В данной реализации цель полностью переизлучает весь поступающий радиолокационный сигнал, причем эффективная площадь рассеяния ориентирована строго перпендикулярно направлению падения зондирующих импульсов. Такой подход позволяет смоделировать максимально возможный уровень отраженного сигнала для заданных геометрических параметров.

Конфигурация обеспечивает точное соответствие физическим принципам радиолокационного наблюдения, где интенсивность отраженного сигнала напрямую зависит от ориентации цели относительно радара и ее эффективной поверхности рассеяния. Особенность реализации позволяет анализировать предельные случаи обнаружения, когда цель находится в оптимальном для детектирования положении.

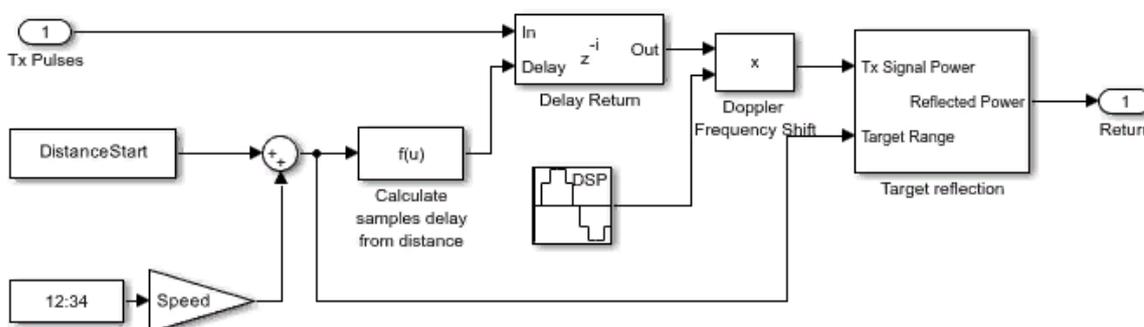


Рисунок 22 работа программы с целью

3.10 Радиочастотный приемник

Приемный тракт системы разработан на основе библиотеки базовых частот RF Blockset, реализуя классическую супергетеродинную архитектуру. Входной каскад приемника включает малошумящий усилитель (LNA) с оптимальным согласованием импедансов, обеспечивающий минимальное ухудшение соотношения сигнал-шум. Последующая обработка сигнала выполняется цепочкой поведенческих моделей, содержащей:

1. Селективный полосовой фильтр, формирующий требуемую частотную характеристику

2. Преобразователь частоты (микшер) для переноса спектра в промежуточную частоту
3. Каскад усиления с существенным коэффициентом передачи, но повышенным уровнем собственных шумов

Такая структура позволяет сохранить баланс между чувствительностью приемника и его избирательностью, что критически важно для надежного обнаружения слабых отраженных сигналов на фоне помех. Поведенческие модели обеспечивают разумный компромисс между точностью моделирования и вычислительной эффективностью.

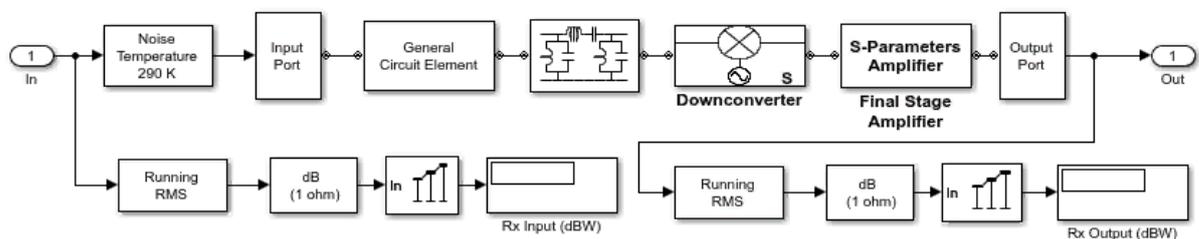


Рисунок 23 структура радиочастотного приемника

3.11 Модуль Rx

Приемный модуль выполняет двойную функцию в данной системе. С одной стороны, он оснащен корреляционным детектором с оптимальным фильтром, специально разработанным для надежного выявления целей. С другой стороны, модуль выступает в качестве испытательной платформы - здесь параллельно с основным фильтром реализована его теоретическая модель, созданная средствами Simulink.

Особенность работы модуля заключается в постоянном сравнительном анализе выходных сигналов обоих фильтрующих устройств. Разностные характеристики этих сигналов автоматически выводятся на отдельный график, что позволяет:

- Оценивать точность практической реализации фильтра
- Контролировать возможные отклонения от теоретической модели
- Оптимизировать параметры обработки сигналов в реальных условиях

Такой подход обеспечивает не только выполнение основной задачи по обнаружению целей, но и постоянный мониторинг качества работы системы, что особенно важно для отладки и совершенствования алгоритмов обработки радиолокационных сигналов.

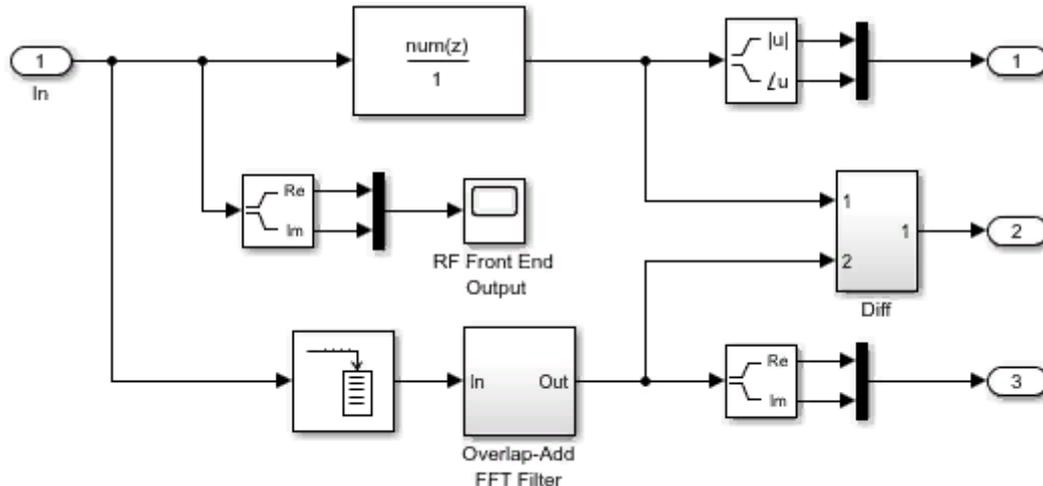


Рисунок 24 пример модуля Rx

Конфигурация параметров цели доступна через диалоговое окно, вызываемое двойным щелчком по соответствующему элементу интерфейса. Пользователь может задать три ключевых характеристики: эффективную поверхность рассеяния, скорость движения и дистанцию до радиолокационной станции.

Следует учитывать физические ограничения системы - при превышении критической дальности или при недостаточной отражающей способности объекта интенсивность эхо-сигнала становится сопоставимой с уровнем шумов, что делает невозможным его надежное детектирование. Данная особенность соответствует реальным условиям работы радиолокационных систем, где обнаружительная способность напрямую зависит от соотношения сигнал-шум.

3.12 Результаты и дисплей

После моделирования откройте четыре представляющих интерес графика сигналов во временной области для изучения.

Первый график, "RadarPulse", отображает представление чирп-сигнала во временной области с рабочим циклом 10%.

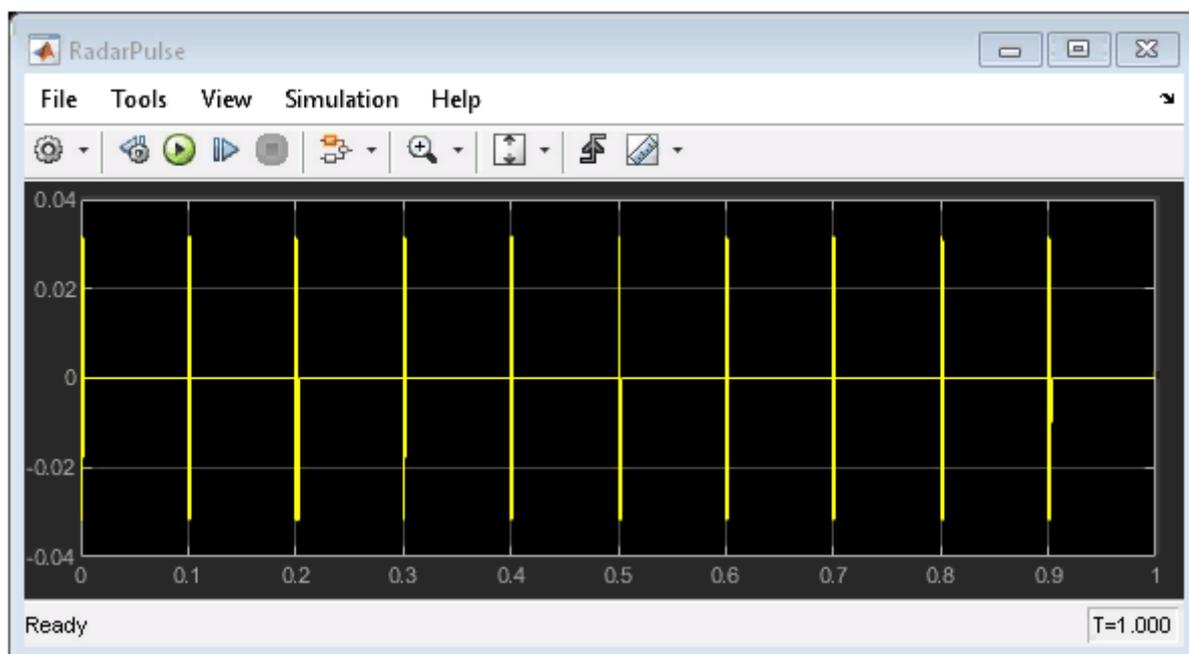


Рисунок 25 первый график

Второй график, "Фильтрация во времени", отображает величину и фазу отфильтрованного обратного сигнала с шумом.

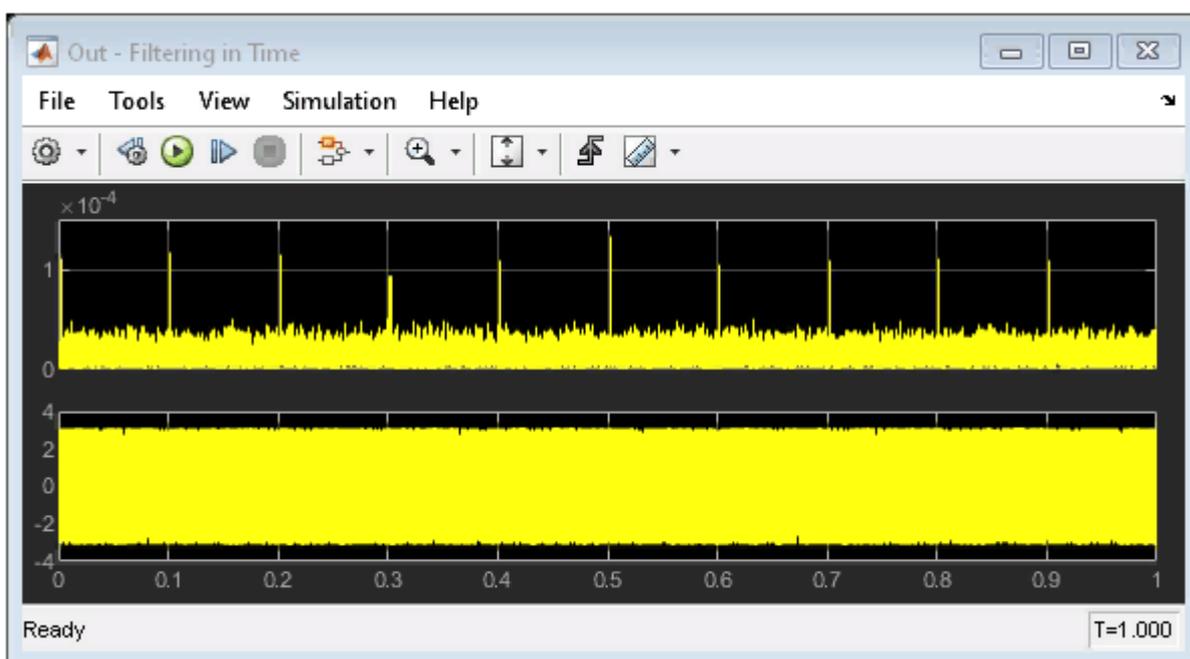


Рисунок 26 второй график

Третий график, "Фильтрация по частоте", отображает реальный и воображаемый отклик отфильтрованного обратного сигнала с шумом благодаря идеальной реализации фильтра.

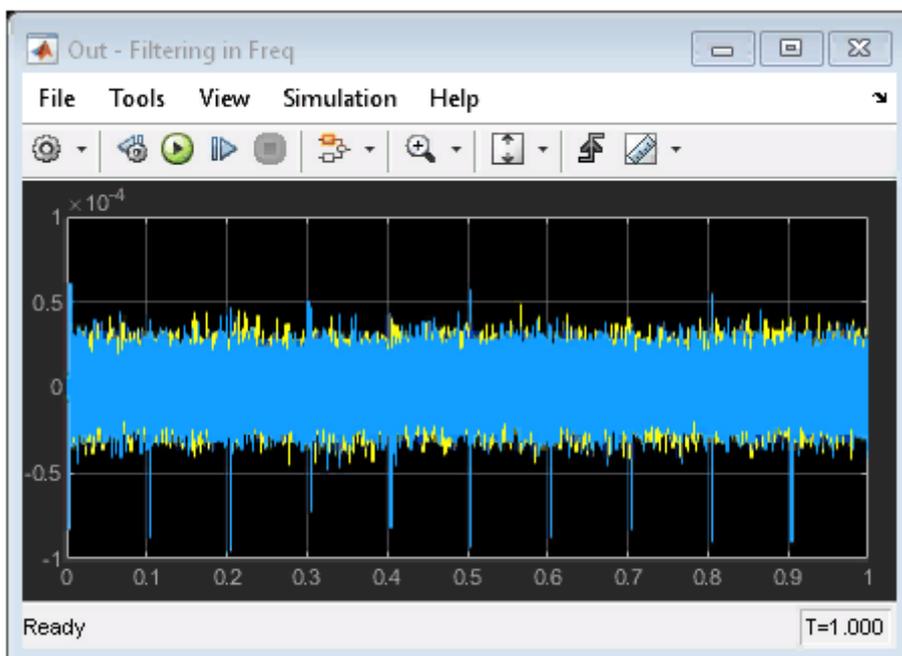


Рисунок 27 третий график

Четвертый график, "Diff", отображает разницу между результатами, полученными при вычислении результатов для графиков два и три.

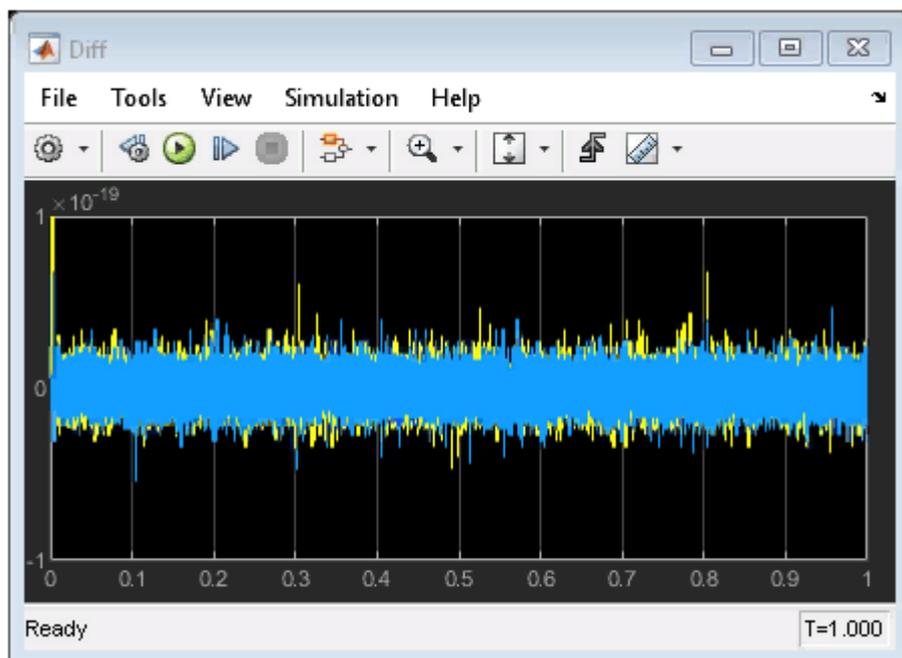


Рисунок 28 четвертый график

В следующих блоках отображаются численные результаты:

Блок Tx Amplitude (dBW) отображает передаваемую мощность в dBW.

Блок Rx Amplitude (dBW) отображает целевую мощность возврата в dBW.

3.13 Моделирование радиочастотного интерфейса при моделировании радиолокационной системы

В радиолокационных системах радиочастотный интерфейс играет ключевую роль в обеспечении производительности. Поскольку он является первым звеном в приемном тракте, параметры его малошумящего усилителя (LNA) критически важны для достижения требуемого отношения сигнал-шум (SNR). В данном примере рассматривается интеграция модели радиочастотного интерфейса в проект радиолокационной системы.

Различные примеры, включая **моделирование тестовых сигналов для радиолокационного приемника в Simulink** и **адаптивный круиз-контроль на основе FMCW и MFSK (Radar Toolbox)**, демонстрируют возможность создания комплексных радиолокационных систем в Simulink с использованием Phased Array System Toolbox™. После построения системной модели часто требуется повысить точность отдельных компонентов, и одним из ключевых элементов для оптимизации является радиочастотный интерфейс.

Преимущество моделирования в Simulink заключается в поддержке многодоменного анализа, что позволяет детально прорабатывать различные аспекты системы без изменения её общей структуры.

3.14 Моностатический радар с одной целью

Первая модель адаптирована на основе примера *моделирования тестовых сигналов для радиолокационного приемника в Simulink*, где имитируется **моностатический импульсный радар с одной целью**. Визуально схема данной модели совпадает с представленной в исходном примере.

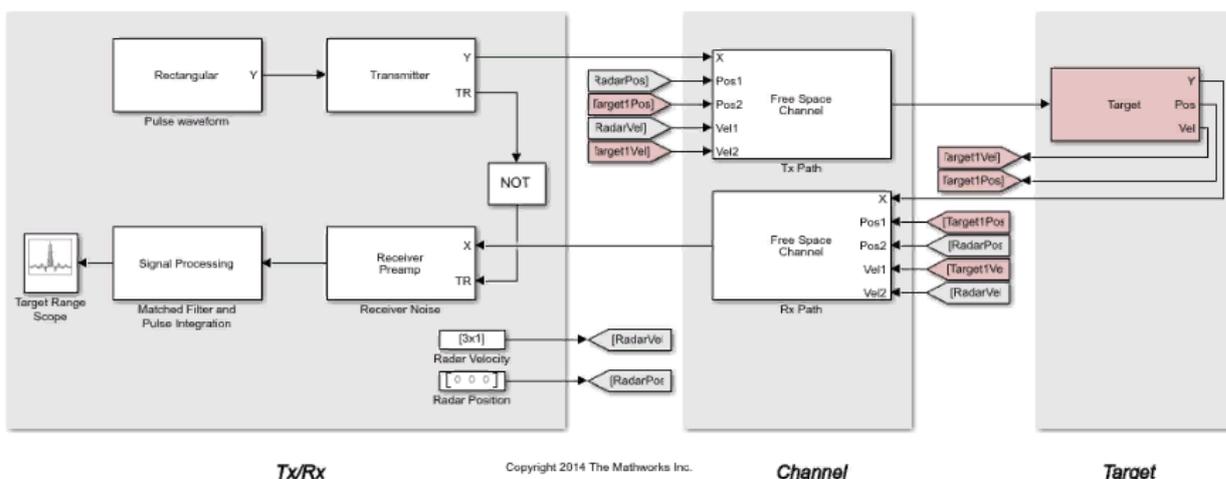
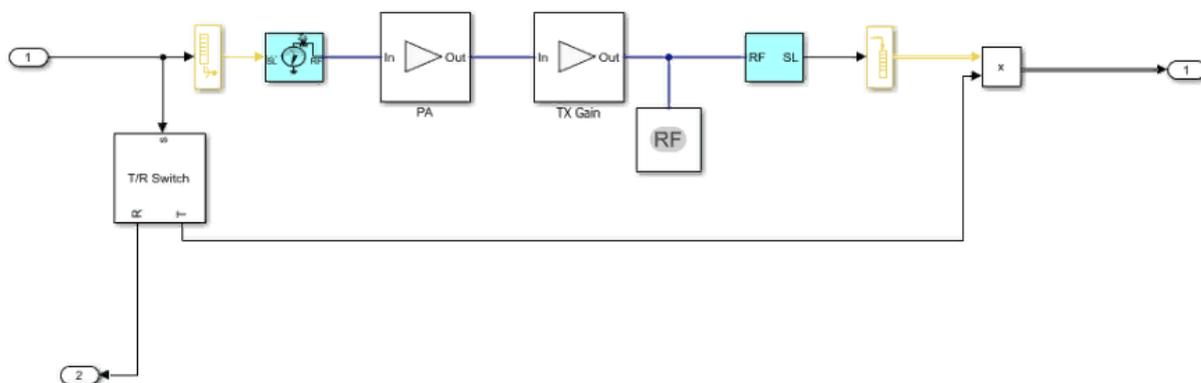


Рисунок 29 моностатический радар с одной целью

При запуске модели результирующий график отображает те же самые данные. Однако при детальном анализе **подсистемы передатчика** становится видно, что теперь он включает **усилители мощности из библиотеки радиочастотных блоков**. Это позволяет модели учитывать поведение **реального радиочастотного интерфейса**.



Аналогичные изменения также реализованы на стороне приемника.

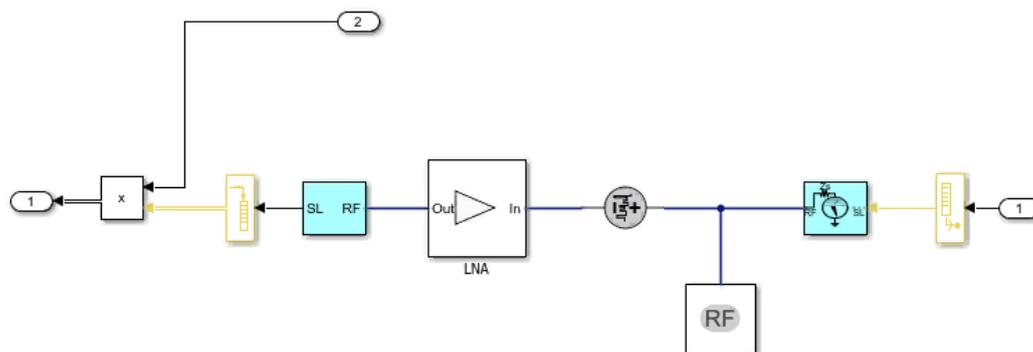
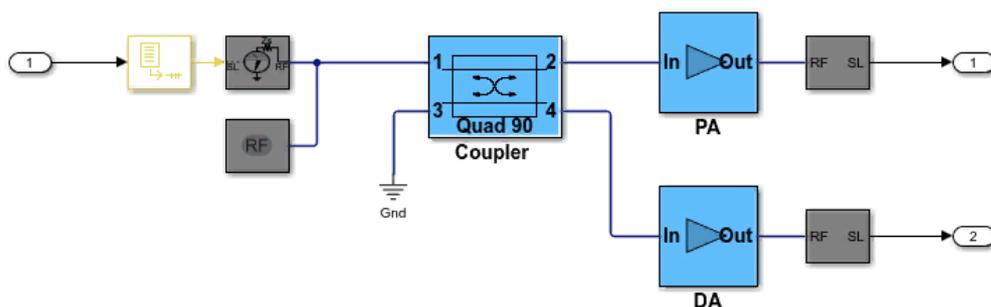


Рисунок 30 модель моностатического радара

Например, в первоначальном моделировании предполагался **идеальный усилитель мощности**. В реальных условиях усилитель обладает **нелинейными характеристиками**. Если установить **точку третьего порядка интермодуляции (IP3) передатчика на 70 дБ** и повторить симуляцию, пик, соответствующий цели, перестанет быть доминирующим. Такое моделирование помогает инженерам оценить **работоспособность системы в различных сценариях**.

3.15 Оценка дальности действия и скорости радара FMCW

Исходная модель взята из примера *"Адаптивный круиз-контроль с использованием FMCW и MFSK"* (Radar Toolbox). В отличие от классического подхода, здесь применяется треугольная частотная модуляция (FMCW), что позволяет одновременно определять дальность до цели и её скорость.



На следующем рисунке показана подсистема приемника.

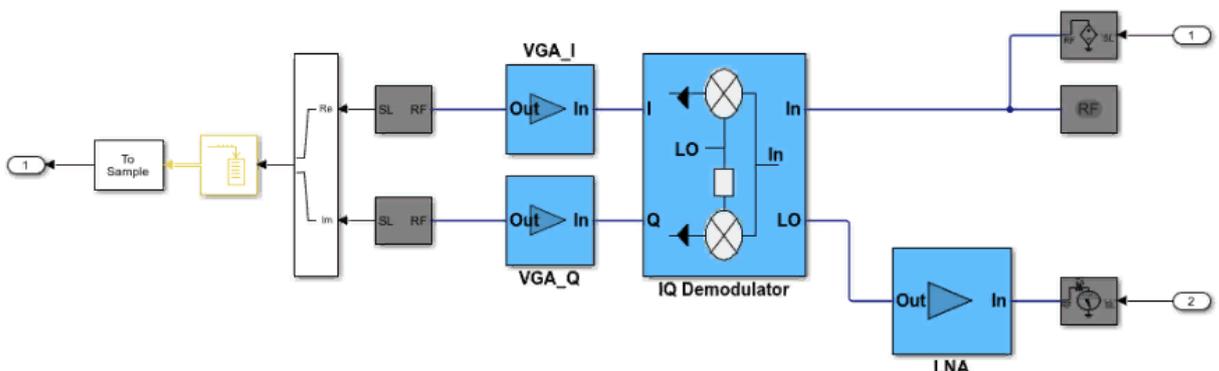


Рисунок 31 подсистема передатчика

На верхнем уровне модель сохраняет архитектуру, аналогичную решениям на базе Phased Array System Toolbox. После выполнения симуляции система выводит расчётные значения дальности и скорости, которые соответствуют положению и относительной скорости автомобиля-цели.

Ключевые изменения: интеграция RF-компонентов

Как и в первом примере, подсистемы передатчика и приёмника были модернизированы с использованием RF Blockset. Это позволяет:

- Учесть нелинейности усилителей,
- Смоделировать шумовые характеристики смесителей,
- Добавить эффекты согласования импедансов и потерь в ВЧ-тракте.

Особенности работы FMCW-радара

В системах с непрерывным излучением часть передаваемого сигнала используется как опорный для декодирования эхо-сигнала. На схеме видно, что:

1. Передаваемый сигнал подаётся на приёмник через направленный ответвитель (coupler).
2. Демодуляция выполняется с помощью квадратурного смесителя (I/Q demodulator), который сравнивает отражённый сигнал с опорным.

Преимущества детализированного моделирования

Настройка параметров радиочастотных компонентов (например, коэффициента шума, уровня интермодуляционных искажений) позволяет:

- Повысить точность оценки дальности/скорости,
- Оценить влияние реальных характеристик RF-цепей на работу системы,
- Оптимизировать конструкцию для разных сценариев (например, при наличии нескольких целей или помех).

Таким образом, комбинация Phased Array System Toolbox и RF Blockset обеспечивает более реалистичное моделирование, приближая виртуальные испытания к реальным условиям.

Выводы по главе 3

Преимущества MATLAB и Simulink, как подсистемы имитационного моделирования в матлаб, в качестве платформы для имитационного моделирования РЛС:

– специализированные радарные библиотеки;

- простота языка и обширный инструментарий;
- совместимость с другими САПР (САПР – система автоматизированного проектирования);
- совместимость с КИО (КИО – контрольно-измерительное оборудование);
- удобство визуализации.

Использование возможностей набора инструментов для системы с фазированной антенной решеткой (Phased Array System Toolbox) совместно с набором радиочастотных блоков MATLAB Simulink позволили значительно повысить точность моделирования.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы была разработана имитационная модель радиолокационной станции (РЛС) в среде MATLAB/Simulink, включая интеграцию радиочастотных компонентов с использованием RF Blockset. Основной целью исследования являлось повышение точности моделирования за счёт учёта реальных характеристик передатчиков, приёмников и антенных систем, а также изучение влияния нелинейных эффектов и помех на работу радиолокационной системы.

Ключевые результаты работы:

1. Разработка структурной схемы модели РЛС:

- Модель включает модули генерации зондирующих сигналов, обработки отражённых сигналов, а также подсистемы для анализа помех и нелинейностей.
- Реализована поддержка различных типов сигналов (импульсных, FMCW), что позволяет адаптировать модель под разные задачи радиолокации.

2. Интеграция радиочастотных компонентов:

- В модель добавлены усилители мощности, малошумящие усилители (LNA), смесители и другие элементы RF-тракта из RF Blockset.

- Продемонстрировано влияние параметров RF-компонентов (например, точки IP3, фазового шума) на точность обнаружения целей.

3. Имитация реальных условий работы РЛС:

- Исследовано воздействие помех, включая активные и пассивные помехи, на качество радиолокационных измерений.
- Показано, как изменение коэффициента усиления антенны или уровня фазового шума гетеродина влияет на отношение сигнал-шум (SNR) и обнаружительную способность системы.

4. Верификация модели:

- Проведено сравнение теоретических и практических результатов обработки сигналов, что подтвердило адекватность модели.
- Реализована генерация кода на C/C++ для возможного внедрения в реальные системы, включая интеграцию с ОСПВ QNX.

Практическая значимость работы:

Разработанная модель позволяет:

- Оптимизировать параметры радиолокационных систем на этапе проектирования.
- Оценивать устойчивость РЛС к помехам и нелинейным искажениям.
- Использовать её в учебных целях для изучения принципов радиолокации и цифровой обработки сигналов.

Перспективы дальнейших исследований:

- Расширение модели для работы с многоцелевыми сценариями и адаптивными алгоритмами подавления помех.
- Внедрение методов машинного обучения для улучшения классификации целей.
- Интеграция с аппаратными платформами для проведения натурных испытаний.

В заключение можно отметить, что применение MATLAB/Simulink в сочетании с инструментами Phased Array System Toolbox и RF Blockset

обеспечивает высокую точность моделирования и позволяет эффективно решать задачи проектирования и оптимизации современных радиолокационных систем. Результаты работы подтверждают возможность использования разработанной модели как в научных исследованиях, так и в промышленных приложениях.

Список литература

1. Логвиненко А. С., Былдин А. Ю., Жураковский В. Н. Модель обработки данных и внешнего окружения в обзорной РЛС // Инновационная наука. 2016. №5-2 (17). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-obrabotki-dannyh-i-vneshnego-okruzeniya-v-obzornoj-rls> (дата обращения: 20.05.2025).
2. Гончаров, П. Л. Перспективные направления применения мобильных радиолокационных станций с активными фазированными решетками / П. Л. Гончаров. —// Молодой ученый. — 2023. — № 51 (498). — С. 31-33.
3. Сидоров В. Г., Козлов М. П. Алгоритмы обнаружения целей в условиях интенсивных помех / В. Г. Сидоров, М. П. Козлов // Вестник МГТУ. - 2020. - Т.23, №4.-С. 112-125. URL: <https://vestnik.mstu.edu.ru/article/3456> (дата обращения: 29.06.2025).