

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем
Управления и радиоэлектроники

Кологривов В.А.
Белашова А.А.

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО РАДИОЛОКАТОРА НА
КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

Методические указания по лабораторной работе в среде функционального моделирования
Simulink системы MatLab для студентов направления «Инфокоммуникационные
технологии и системы связи»

Томск 2022

УДК 621.396.61+621.366.62
ББК 32.848+32.849
К 61

Рецензент:

Мещеряков А.А., доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, канд. техн. наук

Кологривов В. А., Белашова А. А.

К 61 Модельное исследование нелинейного радиолокатора на комбинационных составляющих»: методические указания по лабораторной работе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» - Томск: ТУСУР. Образовательный портал, 2022.– 19 с.

Настоящие методические указания по лабораторной работе составлены с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания содержат описание функциональной модели нелинейного радиолокатора, разработанной в среде Simulink пакета прикладных программ MatLab.

В данном пособии приведены краткие сведения из теории нелинейной локации, краткая характеристика функциональных блоков библиотеки среды Simulink пакета прикладных MatLab, описание функциональной схемы модели, а также требования к экспериментальному исследованию и контрольные вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы.

Одобрено на заседании каф. РТС протокол № 4 от 27.01.22

УДК 621.396.61+621.366.62
ББК 32.848+32.849

© Кологривов В. А., Белашова А. А., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022.

АННОТАЦИЯ

Лабораторная работа «**Модельное исследование нелинейного радиолокатора на комбинационных составляющих**» посвящена экспериментальному исследованию работы нелинейного радиолокатора в среде Simulink пакета прикладных программ MatLab.

В описании сформулирована цель лабораторной работы, приведены необходимые сведения из теории нелинейной локации, краткая характеристика среды Simulink пакета прикладных программ MatLab, описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки Simulink, а также требования к экспериментальному исследованию и контрольные вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы.

Исследование проводится по функциональной схеме, построенной на основе блоков базовых разделов библиотеки Simulink.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ, КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ	5
2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK.....	8
2.1 Общая характеристика пакета Simulink	8
3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА	10
3.1 Описание используемых блоков библиотеки Simulink	10
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	16
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	19

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ, КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Цель работы: изучение структуры и принципа работы нелинейного радиолокатора, работающего на комбинационных частотах, разработанной в среде Simulink пакета прикладных программ MatLab.

Теоретические сведения

Из всего разнообразия возможных методов поиска объектов нелинейная радиолокация занимает одно из важнейших мест и активно развивается с 70-х годов прошлого столетия. Обнаружение нелинейных объектов (НО) в виде закладных устройств является актуальной задачей в настоящее время [1].

Нелинейные радиолокаторы используют два основных способа индикации нелинейного объекта: по гармоническим составляющим переизлученного одночастотного воздействующего радиопульса и по комбинационным составляющим двухчастотного воздействующего радиоимпульса.

Задача использования двухчастотного сигнала в нелинейных радиолокаторах впервые была применена для создания нелинейного радиолокатора с повышенной дальностью обнаружения.

При двухчастотном облучении нелинейные объекты можно обнаружить путем регистрации комбинационных частот в спектре отраженного сигнала, вывод о наличии нелинейного объекта делается при анализе комбинационных составляющих тестового сигнала. принцип работы иллюстрируется на рисунке 1.1. НЛ обнаруживает нелинейные свойства полупроводниковых (ПП) приборов, имеющих в составе любых радиоэлектронных закладных устройств.

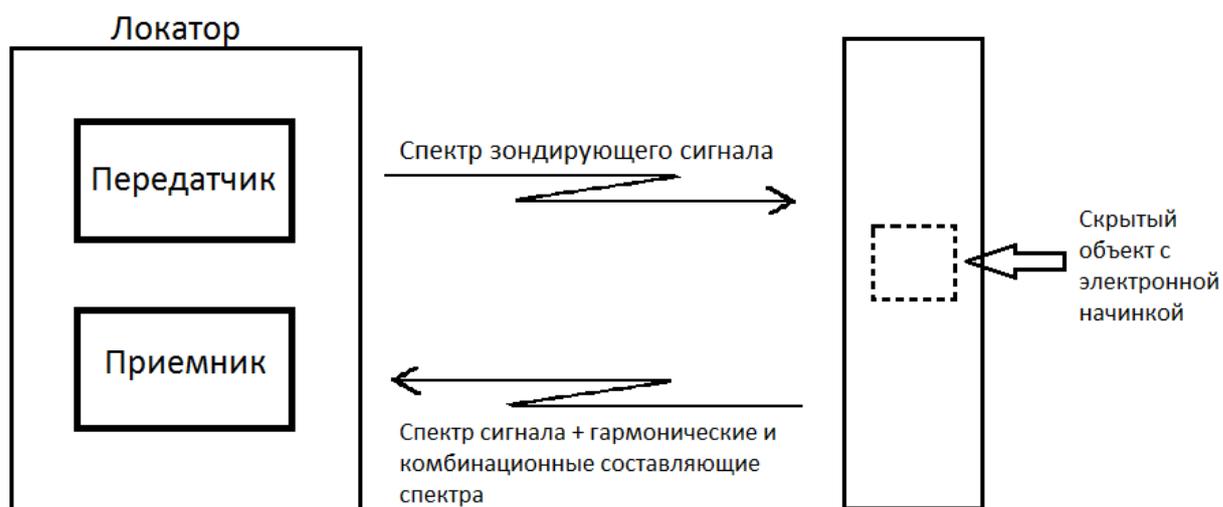


Рисунок 1.1 – Схема работы нелинейного локатора

При работе НЛ излучает высокочастотный гармонический электромагнитный сигнал, который отражается от исследуемой поверхности и принимается приемником НЛ. Существенное отличие заключается в том, что если приемник радиолокационной станции принимает отраженный от объекта эхо-сигнал на частоте излучаемого сигнала, то приемник НЛ принимает гармоники либо комбинационные составляющие, содержащиеся в отраженном сигнале [2]. Следует учитывать, что зондирующие и отраженные сигналы переотражаются близлежащими объектами. Эффективными рефлекторами являются зеркала, металлические плиты, сетки, арматура и т.д. При их облучении можно

регистрировать переотраженные сигналы от нелинейных отражателей, находящихся в том числе за спиной оператора.

Технология двухчастотного зондирования (ДЧЗ) представляет собой весьма эффективный и проверенный практикой инструмент для анализа восприимчивости радиоприемников к помехам по антенному входу.

В данном методе закладное устройство (ЗУ) зондируется двухчастотным сигналом, то есть ЗУ зондируется одновременно гармоническими сигналами и с частотами и соответственно [3]. Приемник такого НЛ выделяет из спектра отраженного сигнала комбинационные гармоники вида , где . При этом сигналы от ЗУ, как правило, имеют наибольшую величину на частотах . Данные комбинационные частоты обусловлены, квадратичным членом ВАХ настоящего полупроводникового перехода. При наличии ложных полупроводников переизлученный сигнал имеет наибольший уровень на частотах - и - [4].

Наличие нелинейности вольтамперной характеристики присуще не только для ПП радиоэлектронных средств, но и для контактов между металлическими предметами с пленкой окислов на поверхности, так называемых МОМ-переходов (металл-окисел-металл), например, ржавых прутьев в железобетонных плитах домов, которые приводят к появлению ложных сигналов.

Для ПП-соединений [5] вольтамперная характеристика описывается несимметричной кривой (рисунок 1.2). Для МОМ-переходов эта кривая не предсказуема и, тем не менее, с определенной долей погрешности вольтамперную характеристику МОМ-переходов в большинстве случаев можно считать достаточно симметричной (рисунок 1.3).

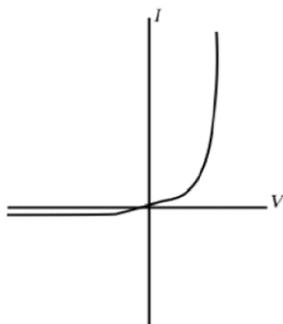


Рисунок 1.2 – Вольтамперная характеристика ПП-соединения

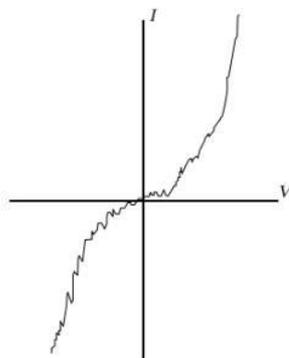


Рисунок 1.3 – Вольтамперная характеристика МОМ-переходов

В целом передающие устройства локаторов, генерирующие зондирующий сигнал, характеризуются следующими основными тактико-техническими характеристиками:

- режимом работы (непрерывным или импульсным);
- пределами регулирования выходной мощности;
- частотой непрерывного излучения;
- частотой следования и длительностью радиоимпульса.

Максимальная дальность действия НЛ определяется чувствительностью приемника. В целом качество приемного устройства, регистрирующего переизлученные электромагнитные сигналы, отражается следующими показателями:

- частотами настройки на регистрируемые гармоники или комбинационные частоты (2-го и 3-го порядков);
- реальной чувствительностью при определенном соотношении сигнал/шум;
- пределами регулирования чувствительности.

Основными параметрами антенной системы, излучающей зондирующие сигналы и принимающей переотраженные излучения на частотах высших гармоник, являются:

- коэффициент направленного действия;
- ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности;
- уровень подавления задних лепестков диаграммы направленности;
- коэффициент эллиптичности (для антенн с круговой поляризацией).

Использование многочастотного зондирующего сигнала обуславливает ряд положительных эффектов [6] по сравнению с одночастотным: увеличение дальности обнаружения и улучшение распознавания нелинейных объектов, обусловленное увеличением нелинейной эффективной поверхности рассеяния за счет резонансных явлений при переизлучении СВЧ сигнала; увеличение дальности обнаружения объектов, расположенных за экранирующими препятствиями, благодаря интерференционным и дифракционным явлениям на верхнем крае препятствия; уменьшение требований к уровню собственных гармоник СВЧ передатчика НРЛС при двухчастотном режиме работы в связи с использованием при приеме фиксированных комбинационных частот.

2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK

Пакет *Simulink* разрабатывается компанией *Mathworks* (www.mathworks.com) и распространяется в составе математического пакета *MatLab*. Пакет основан на графическом интерфейсе и является типичным средством визуально ориентированного программирования. Он обладает обширной библиотекой готовых блоков с модифицируемыми параметрами для построения моделей рассматриваемых систем и наглядными средствами визуализации результатов моделирования.

2.1 Общая характеристика пакета Simulink

Для запуска системы Simulink необходимо предварительно выполнить запуск системы **MatLab**. После открытия командного окна системы **MatLab** нужно запустить систему **Simulink**. Это можно сделать одним из трех способов:

- нажать кнопку (**Simulink**) на панели инструментов системы **MatLab**;
- в строке командного окна **MatLab** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter**;
- выполнить опцию **Open** в меню **File** и открыть файл модели (**mdl**-файл).

Последний способ предпочтителен при запуске уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести моделирование и не нужно добавлять новые блоки в модель. При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (**Simulink Library Browser**).

На рисунке 2.1 выведена библиотека системы **Simulink** и показаны ее разделы. Основная библиотека системы содержит следующие разделы:

- **Continuous** – блоки аналоговых элементов;
- **Discontinuous** – блоки нелинейных элементов;
- **Discrete** – блоки дискретных элементов;
- **Look-Up Tables** – блоки таблиц;
- **Math Operations** – блоки элементов, определяющие математические операции;
- **Model Verification** – блоки проверки свойств сигнала;
- **Model-Wide Utilities** – раздел дополнительных утилит;
- **Port&Subsystems** – порты и подсистемы;
- **Signal Attributes** – блоки задания свойств сигналов;
- **Signal Routing** – блоки маршрутизации сигналов;
- **Sinks** – блоки приема и отображения сигналов;
- **Sources** – блоки источников сигнала;
- **User-Defined Function** – функции, определяемые пользователем.

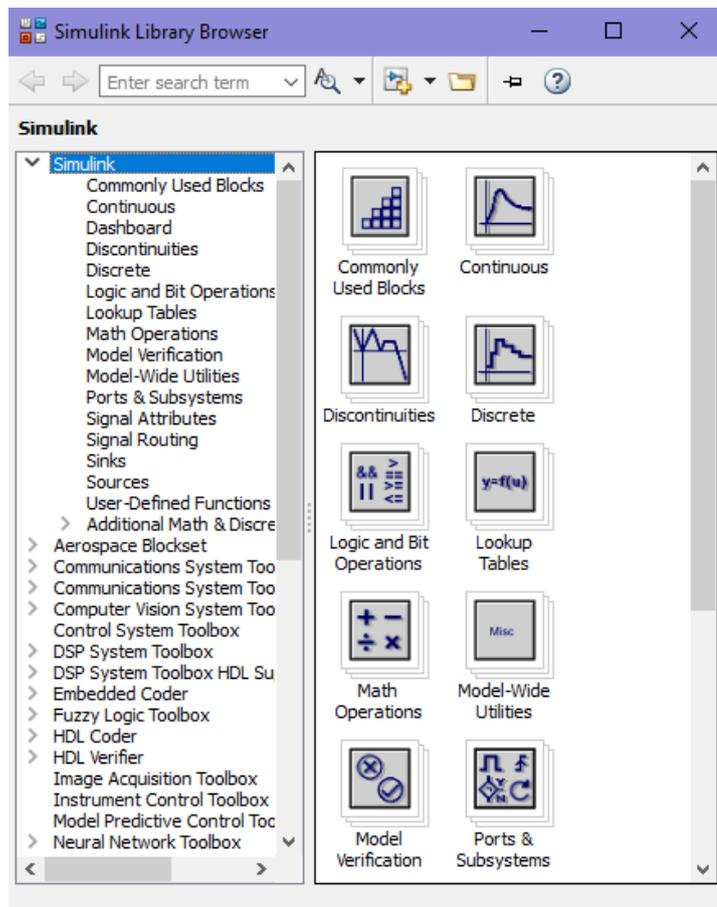


Рисунок 2.1 – Библиотека блоков **Simulink Library Browser**

При работе элементы разделов библиотек "перетаскивают" в рабочую область удержанием левой кнопки мыши на соответствующих изображениях. Для соединения элементов достаточно указать курсором мыши на начало соединения и затем при нажатии левой кнопки мыши протянуть соединение в его конец.

При двойном щелчке левой кнопки мыши на выделенном блоке всплывает меню, в котором задаются параметры блоков.

Работа **Simulink** происходит на фоне открытого окна системы **MatLab**, закрытие которого приведёт к выходу из **Simulink**.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

На рисунках 3.1, 3.2 приведены схемы функциональной Sim-модели нелинейного локатора с использованием различных зондирующих импульсов.

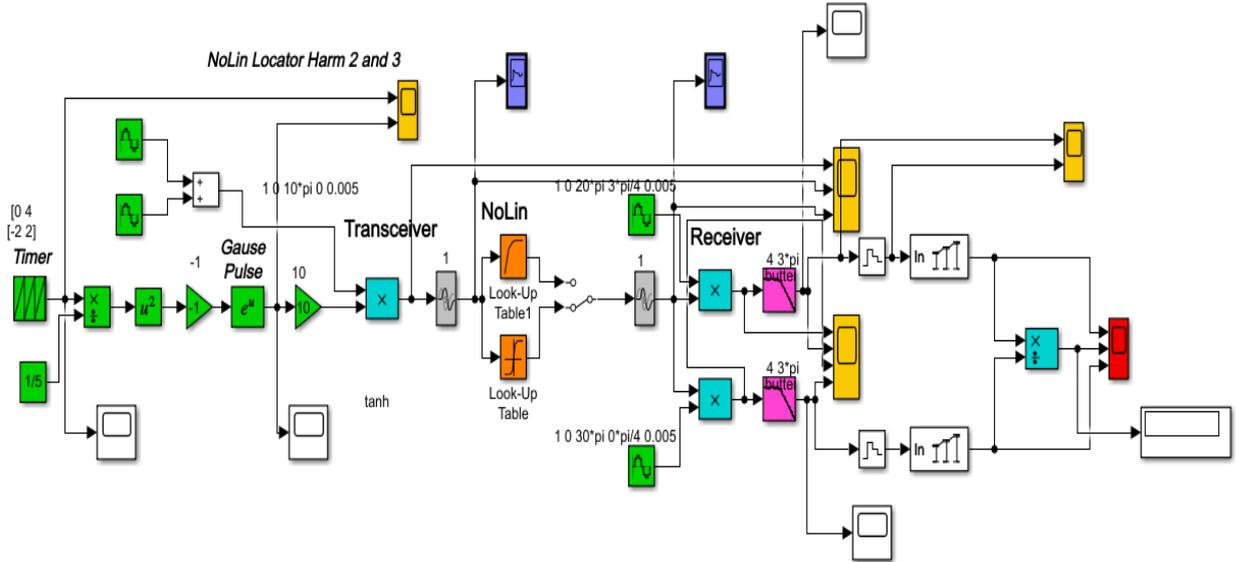


Рисунок 3.1 – Функциональная модель нелинейного радиолокатора с использованием Гауссовских импульсов

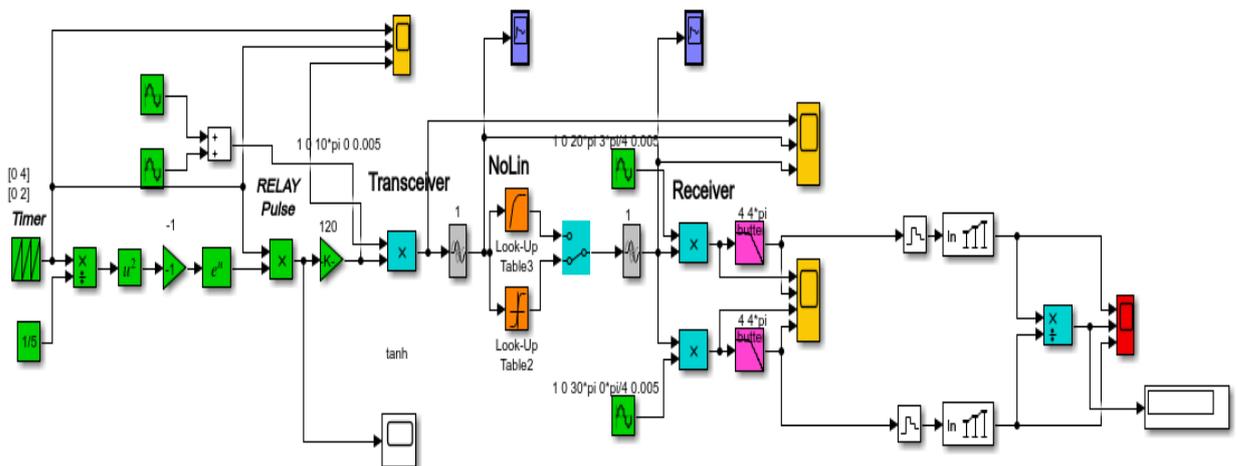


Рисунок 3.2 – Функциональная модель нелинейного радиолокатора с использованием Релеевских импульсов

При формировании Гауссовских и Рэлеевских импульсов применяется генератор пилообразных импульсов, позволяющих ввести так называемое модельное время. Пилообразные импульсы изменяются по форме и амплитуде с помощью блоков **Product**, **Math Function**, **Gain** и на выходе мы получаем импульсы либо Гауссовской либо Рэлеевской формы.

Гауссовские импульсы имеют колоколообразную форму. Их спектр также имеет подобную форму. Особенностью является то, что в спектре отсутствуют боковые лепестки. Благодаря данной особенности такие импульсы удобно использовать в радиосвязи.

Гауссовский импульс описывается следующим выражением:

$$A \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)$$

где A – коэффициент амплитуды, принимается равным единице;

σ – коэффициент формы;

τ – постоянная равная 3,14159.

У Релеевского импульса только задний фронт имеет плавный спад. В спектре отсутствуют боковые лепестки, как и у Гауссовского импульса.

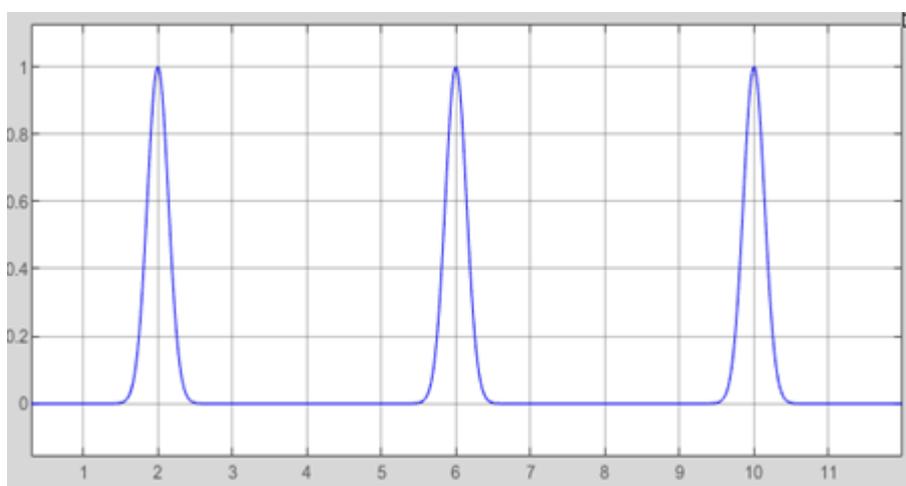


Рисунок 3.3 – Гауссовский импульс

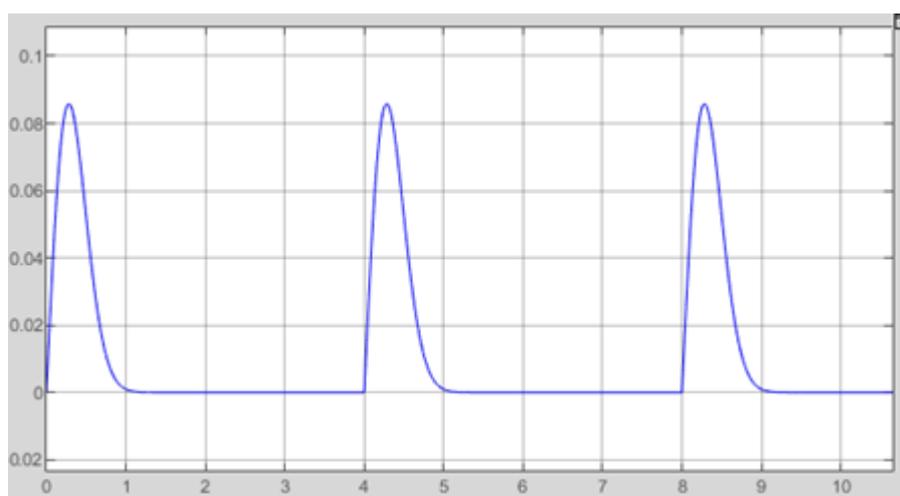


Рисунок 3.4 – Релеевский импульс

Временной форме импульса Рэля соответствует выражение:

где α – коэффициент формы импульса;

β – постоянная равная 3,14159.

Далее сигнал помещается на две несущих частоты путем умножения на сумму несущих разных частот. Данная операция необходима для того, чтобы излучаемый сигнал мог распространяться на большие расстояния и отражаться от препятствий, так как физические свойства исходного импульсного сигнала не позволяют производить обнаружение объектов.

Импульсы разнесены во времени, чтобы излученный импульс не накладывался на принимаемый сигнал. Так как никаких преобразований по расширению спектра не предпринималось, то база α и сигнал узкополосный (ширина спектра определяется длительностью зондирующего радиоимпульса).

Так как используется две частоты, возникают гармоники и комбинационные продукты и импульсы принимают следующий вид:

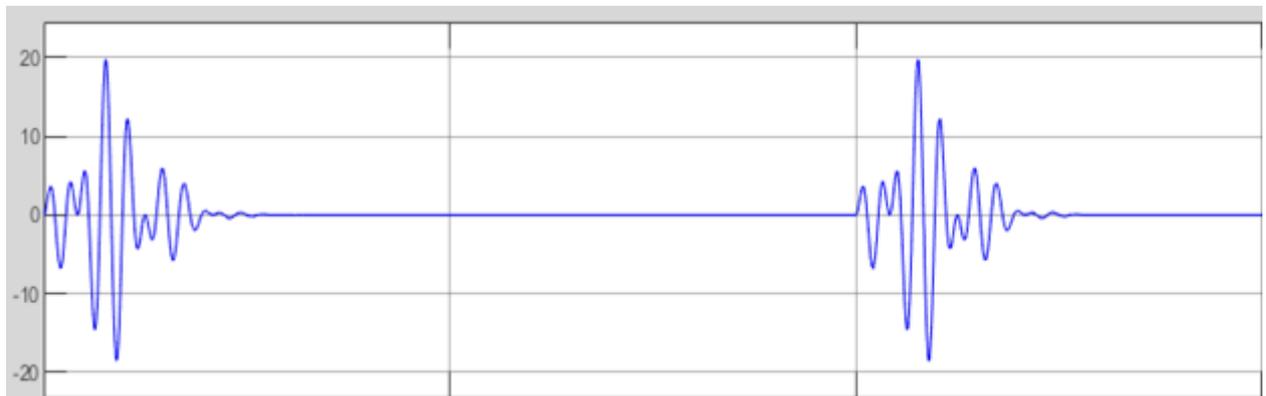


Рисунок 3.5 – Осциллограмма сигнала после перемножения исходного сигнала с суммой несущих разных частот.

Далее сигнал поступает в блок *Transport Delay*, имитирующий прохождение сигнала через пространство. Для имитации целей используется блок *Look-Up Table*. Какая цель будет симитирована зависит от того, какая функция задана в блоках. В схеме расположены две имитации цели: полупроводник и МОМ-соединение («ржавый болт»). Для выбора того, через какую цель пройдет сигнал, в схему включен ручной переключатель (*Manual Switch*). Для определенности МОМ-соединение имитируется функцией $\tanh(x)$, а полупроводниковый элемент положительной частью функции $\tanh(x)$. Затем сигнал снова проходит через блок задержки (*Transport Delay*) и поступает в приёмник.

Приемник реализован как синхронный детектор. Сначала принятый сигнал перемножается с опорными комбинационными частотами (блок *Sine Wave*), а затем происходит низкочастотная фильтрация (блок *Analog Filter Design*). Так как принцип нелинейной локации основан, в данном случае, на выделении комбинационных частот в принятом сигнале, в приемнике ведется параллельная обработка данных частот. Исследуемыми частотами являются частота ω_1 и ω_2 , т.е. комбинационные частоты второго и третьего порядка.

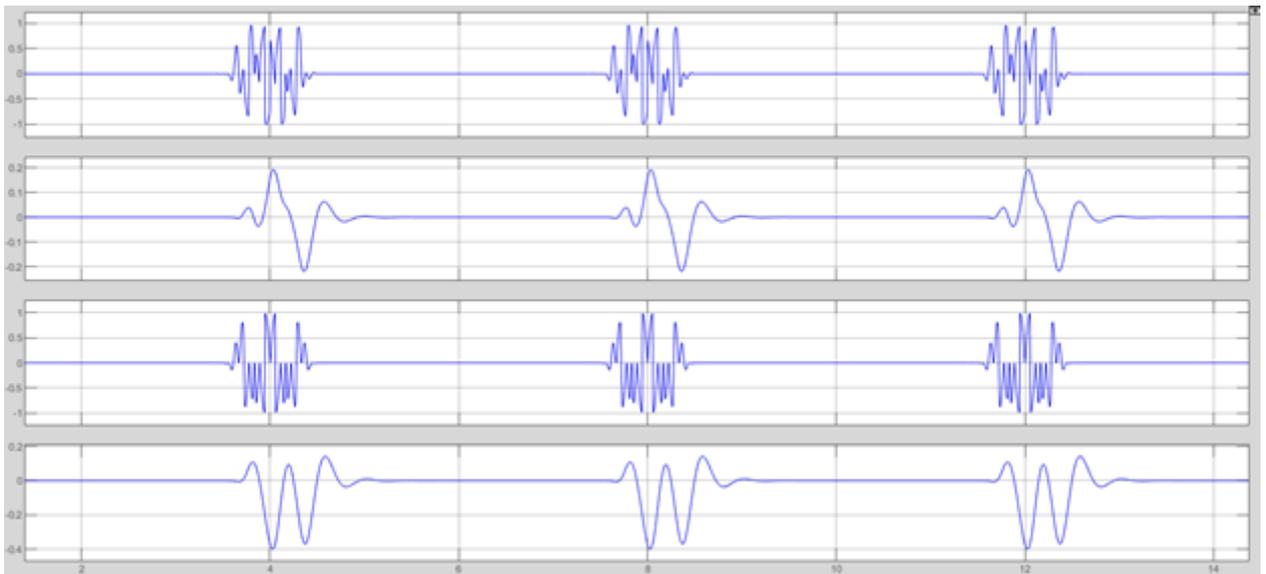


Рисунок 3.6 – Осциллограммы принятых сигналов

На первой осциллограмме представлен сигнал на частоте f_1 , на второй осциллограмме представлен этот же сигнал после прохождения ФНЧ. На третьей осциллограмме представлен сигнал на частоте f_2 , на четвертой осциллограмме представлен этот же сигнал после ФНЧ.

После обработки принятые сигналы поступают в схему принятия решений (блок *Zero Order Hold*). Для удобства оператора в модели реализовано вычисление отношения амплитуд откликов на 1-ой и 2-ой комбинациях (блоки *Maximum* и *Product*), результаты вычислений выводятся на дисплей (*Display*). По полученным результатам оператор определяет от какой из целей после взаимодействия отразился сигнал.

3.1 Описание используемых блоков библиотеки Simulink

Ниже описаны основные блоки базовых разделов библиотеки *Simulink*, используемые в функциональной схеме:



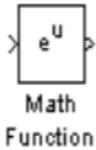
Источник пилообразного сигнала **Repeating Sequence** – формирует периодический пилообразный сигнал, заданной амплитуды и периода.



Источник прямоугольного импульсного сигнала **Pulse Generator** – формирует прямоугольные импульсы, заданной амплитуды, периода и скважности.



Блок **Product** – выполняет мультиплексирование или разделение сигналов.



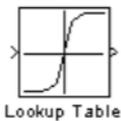
Блок вычисления математических функций **Math Function** – выполняет вычисление некоторых математических функций, которые можно выбрать из списка.



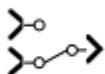
Блок усилителя **Gain** – выполняет умножение входного сигнала на константу.



Блок фиксированной задержки сигнала **Transport Delay** – При выполнении моделирования значение сигнала и соответствующее ему модельное время сохраняются во внутреннем буфере блока Transport Delay. По истечении времени задержки значение сигнала, извлекается из буфера и передается на выход блока. В том случае, если шаги модельного времени не совпадают со значениями моментов времени для записанного в буфер сигнала, блок Transport Delay выполняет аппроксимацию выходного сигнала. Если начального значения объема памяти буфера не хватит для хранения задержанного сигнала, Simulink автоматически выделит дополнительную память. После завершения моделирования в командном окне MATLAB появится сообщение с указанием нужного размера буфера.



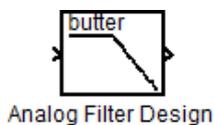
Блок одномерной таблицы **Look-Up Table** – задает в табличной форме функцию одной переменной. Таблицу можно задавать в виде дискретных значений входного и выходного сигнала (например, вектор входных значений [0 1 2 5], а вектор выходных значений [-5 - 10 3 100]) или в виде непрерывного диапазона или вычисляемого выражения (например, вектор входных значений равен [-5:5], а вектор выходных значений равен $\tanh([-5:5])$). Если входной сигнал не совпадает ни с одним из элементов вектора входных значений, то блок выполняет линейную интерполяцию между двумя ближайшими к нему элементами или линейную экстраполяцию по двум крайним элементам



Блок **Manual Switch** выполняет переключение входных сигналов по команде пользователя. Командой на переключение является двойной щелчок левой клавишей “мыши” на изображении блока. При этом изображение блока изменяется, показывая, какой входной сигнал в данный момент проходит на выход блока. Переключение блока можно выполнять как до начала моделирования, так и в процессе расчета.



Источник синусоидального сигнала **Sine Wave** – формирует синусоидальный сигнал с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением.



Analog Filter Design – блок аналогового фильтра заданного метода проектирования и типа из подраздела *Filter Design*; подраздела *Filtering*, раздела *DSP Blockset*. Назначение: аналоговая фильтрация низкочастотных составляющих спектра входного сигнала. Параметры блока: *Design method* – метод проектирования, выбирается из списка: *Butterworth* – фильтр Баттерворта; *Chebyshev I* – фильтр Чебышева 1-го

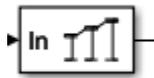
рода; *Chebyshev II* – фильтр Чебышева 2-го рода; *Elliptic* – фильтр эллиптический; *Bessel* – фильтр Бесселя. *Filter type* – тип фильтра, выбирается из списка: *Lowpass* – нижних частот; *Highpass* – верхних частот; *Bandpass* – полосно-пропускающий; *Bandstop* – полосно-заграждающий. Далее для каждого метода проектирования и типа фильтра выдается свой список параметров. Так для фильтра Баттерворта типа нижних частот параметрами являются: *Filter order* – порядок фильтра; *Passband edge frequency (rads/sec)* – нижняя граничная частота (радиан в секунду). Для других методик проектирования и типов фильтров определяемые параметры очевидны.



Блок экстраполятора нулевого порядка ***ZeroOrder Hold*** – Блок выполняет дискретизацию входного сигнала по времени с величиной шага дискретизации по времени *Sample time*. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала квантования и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала квантования. Затем выходной сигнал изменяется скачком до величины входного сигнала на следующем шаге квантования



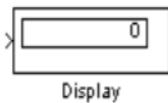
Блок ***Averaging Power Spectral Density*** производит построение графика усредненной мощности входного сигнала.



Блок ***Maximum*** определяет максимальное значение входного сигнала в заданном диапазоне или на отрезке времени.



Осциллограф ***Scope*** – строит графики исследуемых сигналов как функцию времени.



Цифровой дисплей ***Display*** – отображает значение сигнала в виде числа.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Исходные данные.

Для исследования нелинейного локатора при двухчастотном воздействии необходимо установить следующие начальные параметры:

Для исследования модели с использованием Гауссовских импульсов:

1. В блоке *Repeating Sequence* параметр *Time values* – [0 4], параметр *Output values* – [0 2];
2. В блоке *Gain1* задать значение -1, а в *Gain2* задать значение 10;
3. В блоке *Sine Wave1* в передающей части исследуемой модели параметр *Amplitude* принять равным 1, параметр *Bias* – 0, параметр *Frequency (rad/sec)* – $21 \cdot \pi$, параметр *Phase (rad)* – 0, параметр *Sample time* – 1/1000;
4. В передающей части в блоке *Sine Wave2* значения всех параметров выставляются аналогично, кроме *Frequency (rad/sec)*, который принимается равным $15 \cdot \pi$;
5. В блоке *Transport Delay* параметр *Time delay* принять равным 1;
6. В приемной части в блоке *Sine Wave3* параметр *Amplitude* принять равным 1, параметр *Bias* – 0, параметр *Frequency (rad/sec)* – $6 \cdot \pi$, параметр *Phase (rad)* – $3 \cdot \pi / 4$, параметр *Sample time* – 1/1000;
7. В приемной части в блоке *Sine Wave4* параметр *Amplitude* принять равным 1, параметр *Bias* – 0, параметр *Frequency (rad/sec)* – $9 \cdot \pi$, параметр *Phase (rad)* – $0 \cdot \pi / 4$, параметр *Sample time* – 1/1000;
8. В обоих боках *Analog Filter Design* параметр *Filter order* равен 4, параметр *Passband edge frequency (rad/s)* равен $2 \cdot \pi$.

Для модели с использованием Рэлеевских импульсов все параметры задаются аналогичным образом кроме блока *Repeating Sequence*, где параметр *Output values* имеет значение – [-2 2].

Перед допуском к работе дать ответы на контрольные вопросы.

Экспериментальное задание.

Исследование проводится для двух типов объектов: закладное устройство (нелинейность) и «болт». В ходе выполнения данной лабораторной работы требуется выполнить следующие пункты:

1. Собрать Sim-модель нелинейного радиолокатора (см. рис. 3.1), с использованием генератора Гауссовских импульсов.
2. Изменяя полосу в блоке *Analog Filter Design*, определить оптимальную полосу фильтра низких частот по отношению амплитуд откликов 2-ой и 3-ей комбинационных частот. Заполнить таблицу 4.1.
3. Собрать Sim-модель нелинейного радиолокатора (см. рис. 3.2), с использованием генератора Рэлеевских импульсов.
4. Повторить п. 2 для схемы с использованием Рэлеевских импульсов.
5. Лучшие результаты записать в таблицу 4.2. Дать интерпретацию полученным результатам и сделать соответствующие выводы.
6. Составить отчёт по проделанной работе.

Таблица 4.1 – Результаты для схемы с использованием различных зондирующих сигналов (Гауссовских, Рэлеевских импульсов).

Полоса фильтра	Нелинейность (закладка) Амплитуда отклика	«Болт» Амплитуда отклика
π		
2π		
3π		
4π		
5π		

Таблица 4.2 – Сравнительная таблица

Вид импульса	Нелинейность (закладка)	«Болт»
Гауссовский импульс		
Рэлеевский импульс		

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается принцип работы нелинейного радиолокатора?
2. В чем состоит главное отличие работы нелинейного локатора от работы радиолокационной станции?
3. Привести ВАХ ПП-соединений и МОМ-диодов.
4. Пояснить, как реализуются цель НЛ и (нелинейность, «болт») в Sim-модели.
5. Для чего применяется импульсный режим?
6. Особенности непрерывного режима.
7. Какой способ приема реализован в приемниках?
8. Какие опорные частоты используются в приемниках?
9. Как определяются полосы пропускания фильтров приемников?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доматырко, Д.Г. Исследование ЛЧМ сигналов в моделях нелинейного радиолокационного зондирования объектов / Доматырко Д.Г., Панычев С.Н., Чураков П.П. // Вестник воронежского государственного технического университета, 2014. – С. 26-30.
2. Щербаков, Г.Н. К оценке фундаментальных пределов в нелинейной радиолокации / Щербаков Г.Н., Шлыков Ю.А., Николаев А.В., Бровин А.В. // Спецтехника и связь. – 2008. – № 2 – С. 21 – 25.
3. Иванов, М.М. Обзор методов обнаружения нелинейных элементов с помощью нелинейного радиолокатора / Иванов М.М., Железняк В.К., Чертков В.М. // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2017. – Серия С, №12 – С. 10 – 16.
4. Забеньков, И.И., Жданов, С.Л. Современные принципы построения приемных и передающих трактов цифровой радиосвязи // Доклады БГУИР, том 1, № 1, 2003. – С. 65–69.
5. Волюнец, Н.А., Кереселидзе, Е.В. Способ обнаружения и распознавание объектов с нелинейной вольтамперной характеристикой // Доклады БГУИР. – 2009. – № 8 (46) – С. 28 – 32.
6. Доматырко, Д.Г. Сравнительный анализ применения одночастотного и двухчастотного зондирующего сигнала в нелинейном радиолокаторе / Доматырко Д.Г., Козачок Н.И., Ибрагимов Н.Г. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – №3 – С. 68 – 70.