

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой ИКТ,  
д.т.н.  
\_\_\_\_\_ С.Н. Даровских  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

**Технологии программно-конфигурируемом радио в приложении к  
радиоприемным устройствам**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–Д.11.03.02.2020.308.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы  
\_\_\_\_\_ А.Н. Казимиров  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы,  
студент группы  
\_\_\_\_\_ Г.Н.Лубо  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер,  
\_\_\_\_\_ В.Д. Спицына  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## РЕФЕРАТ

ЛубоГ.Н. Технологии программно-конфигурируемом радио в приложении к радиоприемным устройствам. – Челябинск: ЮУрГУ, ИКТ, 2020, 63 стр., 41 ил., библиогр. список – 10наим., 3 л., плакатов ф. А1.

В данной работе объектом исследования является радиоприемное устройство на основе технологии программно-конфигурируемого радио.

Цель работы – реализовать радиоприемное устройство на основе технологии программно-конфигурируемого радио. Для достижения цели научно-исследовательской работы решены следующие задачи:

- проведен обзор технологии программно-конфигурируемого радио;
- разработана модель радиоприемного устройства.

В ходе выполнения работы было реализовано радиоприемное устройство на основе технологии программно-конфигурируемого радио. Проведено исследование работы радиоприемного устройства на основе технологии программно-конфигурируемого радио. А именно: сигналы и спектрограммы принятых сигналов.

					ЮУрГУ– Д.11.03.02.2020.221.00 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Лубо Г.Н.			Технологии программно-конфигурируемом радио в приложении к радиоприемным устройствам.	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Казимиров А.Н.					3	53
Реценз.						ЮУрГУ Кафедра ИКТ		
Н. Контр.		Спицына В.Д.						
Утверд.		Даровских С.Н.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ .....	6
1 Технология программно-конфигурируемого радиоSDR .....	7
1.1 Краткая история SDR.....	7
1.2 Что такое программно-определяемое радио - SDR? .....	8
1.3 Сети связи и SDR .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.4 Архитектура RTL-SDR .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.5 Обработка сигналов в RTL-SDR.....	22
1.6 Программное обеспечение для RTL-SDR .....	24
2 Теоретическая часть.....	29
2.1 Квадратурная модуляция и демодуляция в вещественной форме.....	29
2.2 Модуляция и демодуляция сигналов в комплексной форме.....	<b>Ошибка!</b> <b>Закладка не определена.</b>
3 Экспериментальная часть.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.1 Моделирование вещественных и комплексных сигналов.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2 Моделирование процессов квадратурной модуляции и демодуляции .....	44
4 Применение RTL-SDR для приема FM-радиостанций.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1 Работа RTL-SDR в программе «SDRSharp».....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	77
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	78



## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря стремительному развитию цифровой техники и электроники в последнее время наблюдается значительный прогресс в области радио. Сегодня мощные вычислительные ресурсы позволяют создавать так называемые программно-определяемые радиосистемы (software-definedradio или SDR) вместо аппаратных радиосистем на основе требуемых в таких случаях компонентов (фильтров, смесителей, модуляторов, демодуляторов и т.п.).

Радио на программном уровне — перспективное направление, дающее почти неограниченную свободу для анализа сигнала и взаимодействия с радиоустройствами. Еще совсем недавно эта технология была доступно лишь избранным, но сейчас вокруг SDR формируется огромное сообщество любителей и профессионалов.

Softwaredefinedradio — это такой вариант конструкции радиоприемника, при котором часть его реализована программным образом. SDR позволяет отказаться от идеи создания узкоспециализированных, сложных приемопередатчиков и использовать для большей части обработки сигналы CPU обычного компьютера и FPGA/CPLD на плате.

## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Согласно техническому заданию на дипломную работу необходимо выполнить исследование радиоприемного устройства на основе технологии программно-конфигурируемого радио. Для выполнения поставленной задачи необходимо изучить специальную литературу на данную тематику, рассмотреть основные программы управления радиоприемником, принять реальный сигнал и получить его спектр.

С развитием современных компьютерных технологий цифровой обработки сигналов и алгоритмы систем связи и многие другие элементы эволюционировали в современной коммуникации в формах, чтобы, наконец, быть в состоянии передать большое количество информации, времени реального, без каких-либо ошибок. Одним из самых больших исследований в области технологии систем связи является создание программно-определяемое радио (software defined radio или SDR и или программно-конфигурируемое радио ПКР), обеспечением, иначе известным по названию RTL-SDR, который содержит в себе большую часть современных технологий с этой конечной возможностью приемника. Эта технология может быть использована во многих отношениях и на для нашей работы мы будем искать, как использовать его в Matlab, а также с Simulink, чтобы иметь в режиме реального времени понимание того, как работает прием радиосигналов, которые транслируются в эфире.

## 1 Технология программно-конфигурируемого радио

### 1.1 Краткая история SDR

С развитием современных компьютерных технологий цифровой обработки сигналов и алгоритмы систем связи и многие другие элементы эволюционировали в современной коммуникации в формах, чтобы, наконец, быть в состоянии передать большое количество информации, времени реального, без каких-либо ошибок. Одним из самых больших исследований в области технологии систем связи является создание программно-определяемое радио (softwaredefinedradio или SDR и или программно-конфигурируемое радио ПКР), обеспечением, иначе известным по названию RTL-SDR, который содержит в себе большую часть современных технологий с этой конечной возможностью приемника. Эта технология может быть использовать во многих отношениях и на для нашей работы мы будем искать, как использовать его в Matlab, а также с Simulink, чтобы иметь в режиме реального времени понимание того, как работает прием радиосигналов, которые транслируются в эфире.

Именно в этом проекте мы будем говорить о создании набора различных приемников, используемых для аналоговых и цифровых систем связи ; как мы будем наблюдать прием, демодуляция и декодирование радиосигналов в режиме реального времени, идентичные нашему RTL-SDR антенны с помощью программного обеспечения Matlab/Simulink. Это действительно дальше в нашей работе, что мы действительно будем также говорить о принципах цифрового передатчика и приемника, еще лучше сделать небольшой комментарий о компонентах DSP, таких как цифровые фильтры, кодеры, декодеры и фазовые синхронизаторы, все, что мы цитировали ранее достижимы в Matlab и Simulink.

Первое поколение цифровых радио появились около 1990-х годов, аналогия часть этой концепции радио преобразует радиосигналы в IF (промежуточная частота) с помощью осциллятора (LO), а затем снова сигналы IF будут преобразованы всегда с помощью другого осциллятора (LO), чтобы получить

базовую полосу. Сигнал базовой полосы будут отбираться и оцифрованы АЦП, а затем DSP используются для выполнения шагов окончательной обработки для получения передаваемой информации. Мобильные телефоны второго поколения в 1990-х годах были теми, кто получал сигналы GSM. Вероятно, использовали эту архитектуру. Необходимо напомнить, что первое поколение мобильных телефонов появилось в 1990-х годах, а на самом деле было полностью аналоговым, используя стандарты.

По прибытии в 1995 году термин программно-определяемое радио был принят, по инициативе Стивена Blust, который опубликовал одну из своих работ на первой встрече, основанной на запросе информации от BellSouthWireless.

Это происходит в новом поколении там мы уже в 2000 году, что процессы отбора проб и сканирования на самом деле начинают быть более использовать в нескольких устройствах с совместимостью сигналов IF. Сигналы IF, достигающие около 40 МГц, теперь могли поддерживаться запрограммированным АЦП на частоте около 125 МГц. В этом поколении DSP должен был сначала использовать прямой цифровой преобразователь (DDC) для передачи сигналов IF в базовую полосу путем демодуляции и фильтрации через децимацию.

Мы посылаем вам продолжить, потому что список соответствующих элементов, связанных с SDR технологий будет действовать в строках ниже.

## 1.2 Что такое программно-определяемое радио - SDR?

Программное радио (или Softwaredefinedradio - SDR) - это настраиваемая система радиосвязи с использованием цифровых технологий обработки сигнала на программируемых цифровых схемах. Это во время каждой организации пытается найти общую основу, чтобы обеспечить легкую связь между профессионалами, которые работают в аналогичных областях исследований или разработки продукта.

SoftwareDefined - Это относится к использованию программного обеспечения обработки в радиосистеме или устройстве для реализации функций работы (а не Управления).

SoftwareControlledRadio - Радио, в котором некоторые или все функции физического уровня контролируются программным обеспечением.

SoftwareDefiniedRadio (SDR) - Это радио, в котором некоторые или все функции физического уровня определяются программным обеспечением.

Receiver - Это устройство, которое принимает радиосигнал и предоставляет добытую информацию.

В области приемника RTL-SDR имеет процесс демодуляции, который обычно происходит в два этапа, который от RF к IF в аналоговом оборудовании, а затем IF в конечном итоге к базовой полосе, которая будет реализована. Работа по демодуляции может быть выполнена с помощью программного обеспечения, которое со всем удобством выбирает полосы частот RF, которые будут у него в распоряжении.

Сочетание цифровой обработки и аналоговой RF (радиочастотный сигнал) всегда составляло систему связи. Сегодня развитие системы обработки сигнала настолько выдвинуто что большинство основной полосы включено в программное обеспечение. Гибкость ВЧ аппаратных был пересмотрен и перенастроен, чтобы, наконец, быть не в состоянии обрабатывать большинство RF систем. Нормальный фронтальный RF управляется программным обеспечением больше, чем определяется программным обеспечением, именно эта современная комбинация привела нас к рождению программно-определяемого радио.

SDR это сложное оборудование с такой возможностью одновременно выполнять несколько задач одновременно в порядке относительно передачи и приема поступающих к нему данных. Цифровая система связи включает в себя независимый и последовательный способ обработки различных типов

информации может импортировать, будь то человеческая речь, музыка, видео или изображения, а затем он передает его на приемник для обработки и декодирования в соответствии с оригинальной версией сигнала.

Если, например, мы сталкиваемся с аналоговой информацией (случай аудио), она должна быть в первую очередь оцифрована, используя известный технический способ квантования, чтобы иметь в качестве конечного результата двоичное представление этой информации. После получения двоичной формы информации цифровой передатчик, в свою очередь, принимает от него эту информацию преобразует его в виде электромагнитной волны (синусоиды), которая по своим уникальным физическим признакам, таким как его amplitude, частота и фаза.

Таким образом, на другой стороне канала связи приемник предназначен для получения тех же физических характеристик в виде волны, но последний будет проходить через шумный, заполненный искажениями канал, и в конечном итоге будет возвращен в виде правильного двоичного сигнала. Как вы можете в чертеже (см. рисунок 1.1):

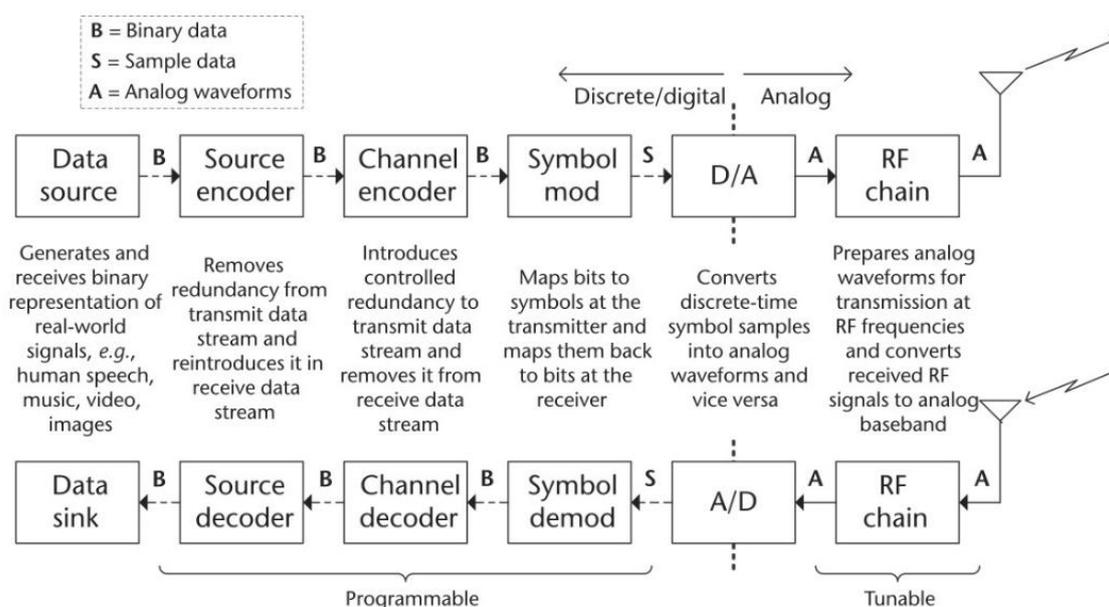


Рисунок 1.1 – Современное представление элементов, которые составляют систему цифровой связи.

Этот рисунок показывает нам, что вход передатчика и выход приемника поступают из цифровых источников, соответственно эти два блока представляют источник и назначение цифровой информации, которая излучается между передатчиком и приемником. После того, как наша двоичная информация поступает в передатчик, он имеет первую цель устранить из любой формы повторения, заказать его для хорошей эффективности передачи. Эта операция выполняется в блоке `sourceencoder`, который предназначен для оценки цифровой информации во всей ее полноте, чтобы устранить любые аномалии, с которыми сталкивается информация.

В канале, он также анализирует и исследует недостатки, содержащиеся в этой информации, а затем, проанализировав его, он всегда возвращает его в двоичном виде после того, как убедился, что эта информация больше не несет никаких дефектов. Затем наступает этап `e` или бинарная информация будет преобразована в уникальную форму электромагнитной волны, свойства которой амплитуда, частота несущей, и фаза.

Все эти операции выполняются с помощью `phicartogra` под названием "модуляция". Эта операция также похожа на приемник, который, в свою очередь, играет роль «демодуляции», которая сводится к преобразованию электромагнитной волны в ее предыдущую двоичную форму. В блоке демодуляции электромагнитная волна не будет превращаться в двоичную информацию, как мы знаем, но он будет с другой стороны положить в виде аналоговой волны в базовую полосу с помощью цифрового преобразователя перед обработкой на радиочастоте (RF) и преобразуется в несущую частоту.

Учитывая сложность SDR и его соответствующих компонентов, очень важно знать и понимать ограничения нашего SDR и как различные разрешения, индивидуальные манипуляции этой конструкции может повлиять на его производительность и эффективность. Например, очень желательно иметь дело с операциями в режиме реального времени, быть в состоянии обнаружить спектры и

гибкой передачи с хорошей пропускной способностью, что желательно высокой с очень низкой задержкой.

Однако если микропроцессор не использовать SDR будет не настолько мощным, чтобы иметь возможность выполнять операции, команды, которые будут даны ему в результате этого, мы должны вернуться к этой общей концепции передатчика и приемника, то есть требования низкой латентности и высокой пропускной способности. В противном случае все известные SDR будут неисправны, то есть не будут работать должным образом, с этой ситуацией мы столкнемся с ошибками передачи и плохими характеристиками связи.

Следовательно, мы должны учитывать эти несколько принципов при разработке цифровых систем связи на основе платформы SDR.

Интеграция физических и сетевых уровней через встраивание протокола в режиме реального времени на процессоре. Особенно следует помнить, что многие системы связи разделены на слой и сортировку, чтобы облегчить проектирование системы связи (вы могли бы связаться с ней в графическом представлении выше). Вот почему желательно, чтобы каждый был хорошо спроектирован, чтобы облегчить сильное взаимодействие между всеми слоями.

Гарантирует, что пропускная способность фронтального радио должна быть настолько широкой с возможностью связи с несколькими другими подканалами и масштабируемым числом антенн для пространственной обработки частот. В последние годы мы даже можем заметить, что есть много передовых дизайн связи, которая включает в себя использование различных антенн и передачи с более широкой полосой, проходящей, потому что мы уведомляем вас, что SDR оборудование в состоянии сделать все, что это, как физическое распределение.

Многие сети используют цифровые системы связи, которые имеют структуру централизации для контроля деятельности сети в целом (например, реализация каналов управления). Наличие знаний о структуре радиосети важно, и

будет облегчать понимание того, какие операции полезны для цифрового приемопередатчика  $r$ , чтобы иметь возможность общаться с другим.

Возможность проведения экспериментов по контролю различных типов сред (например, наблюдения и многолучевого, внутреннего и наружного) очень полезна для демонстрации надежности той или иной реализации SDR. Это означает, что если тестер использует прототип системы SDR два раза подряд в одной и той же области, в среде локализации с использованием одних и тех же рабочих параметров, поэтому всегда ожидайте увидеть те же данные о производительности, полученные при первой попытке.

Вместо того, чтобы делать фиксированную аналоговую обработку и фиксированные схемы, многие из систем связи, используемых каждый день реализуются с помощью SDR, который основан на микроэлектронике, программируемой цифровой логике и других типов вычислительных устройств.

Чтобы воспользоваться новыми достижениями в обработчиках, языки высокого уровня, такие как MATLAB и Simulink, используются гораздо больше, чем C.

Эта эволюция компьютерных технологий повлияла на расширение новых возможностей и возможностей связи, таких как более эффективная спутниковая связь, мобильная связь, модемы данных и цифровое телевидение.

### 1.3 Сети связи и SDR

Эволюция цифровой системы связи - сложное устройство, стало очевидно, что стратегия разделения и завоевания необходимо, чтобы дизайн и создание таких систем быть разработаны и управляемы впоследствии. Исследователи разделили цифровую систему связи на совокупность дополнительных слоев, каждый из которых заполнял вполне определенное пятно в рамках общего процесса передачи и получения информации. Именно благодаря этой идее разделения и завоевания, системы связи быстро эволюционировали в

высокоэффективные платформы, которые выполняют широкий спектр операций, таких как просмотр веб-страниц и распространение мультимедийного контента по электронной почте.

Эта стратегия начала работы многоуровневой коммуникационной системы достигла такого успеха, что даже привело к возникновению целого исследовательского сообщества, которое фокусируется только на одном из слоев и ни на одном из других ; они воспринимают информацию, поступающую из слоев выше и ниже их слоя как само собой разумеющееся.

Как правило, существует два типа моделей для разделения системы связи на слои : модель OSI (OpenSystemInterconnect) (рисунок 1.2) имеет 7 уровней и модель TCP (протокол управления передачей) /InternetProtocol (IP) имеет 5 уровней. Все эти модели имеют репримерно одинаковую функциональность, но модель TCP / IP объединяет разные верхние слои, образуя только один. Основываясь на модели TCP / IP имеет 5 слоев, она состоит из следующих слоев, сверху вниз:

Прикладной уровень: этот интерфейс является пользователем данных системы связи. В качестве примера этот уровень приложения использует данные, поступающие или предназначенные для программного обеспечения, работающего с веб-отрицателями, клиентами мессенджеров и мультимедийными интерфейсами, включая. Эти приложения сделаны по назначенному сокету.

Транспортный уровень: его обязанность заключается в передаче информации на уровне приложения между уровнем клиентского приложения и серверным приложением. Это обеспечивает надежную передачу данных.

Сетевой уровень: этот уровень просто способствует передаче пакетов сетевого уровня с одного хоста на другой хост. Затем эта процедура qu'ilva определяет формат дейтаграмм (пакетов данных в компьютерной сети или сети связи)таким образом, что конечные системы и маршрутизаторы действуют на

дейтаграммы, таким образом, определяя маршруты, которые будут использовать дейтаграммы между исходным и predetermined назначением.

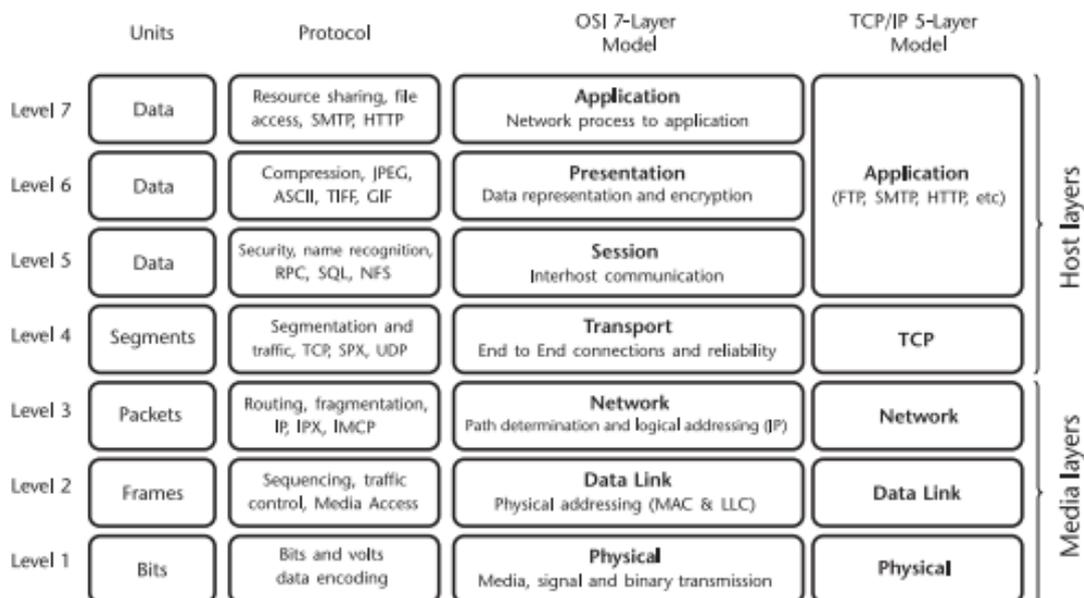


Рисунок 1.2 – Модель OSI

**Связывающий слой:** этот слой поддерживает обмен данными между двумя или более устройств, непосредственно подключенных друг к другу. **Надежность:** это включает в себя обнаружение и исправление ошибок, а также адресацию различных систем связи.

**Физический уровень:** этот уровень отправляет отдельные биты из одной системы связи непосредственно в другую систему связи, а также охватывает физический интерфейс между устройством передачи данных и носителем передачи.

Давайте основываться на радиосистеме и ее реализации, большая часть этой конструкции будет сосредоточена на физическом уровне, но мы не будем игнорировать, где поставить рейтинг, как связывающий слой может повлиять на физический уровень. Тем не менее, обработка базовой полосы полностью выполняется программным обеспечением, есть такая возможность, что система связи заключается в реализации верхних слоев стека в программном обеспечении. Многие стандарты связи приняли эту схему, или в целом система связи через все

слои реализованы в программном обеспечении, хотя в зависимости от требований к скорости передачи данных, это может потребовать значительных вычислений, а также возможности системы для обеспечения работы в режиме реального времени. Все программные реализации позволяют функциональные обновления без замены оборудования. Практически, это обычно делается только на скорости передачи данных довольно низки. В то же время представьте, что вы применяете обновление программного обеспечения к маршрутизатору Wi-Fi и можете реализовать следующий стандарт без необходимости менять оборудование. Эта система нового поколения стоила бы дороже чем фиксированная аппаратная система, но были бы охотно готовы едоки а оплатили больше? но исторически нет.

Для этого вида применения, цена часто один из самого критического фактора для успеха продукта. Большая часть потребителей не думают о длительном обслуживании и стоимости продукта, обращаясь к различным сортам продуктов, которые они могут найти на Amazon. Компромиссы, функция или слой делается в фиксированном оборудовании против гибкого программного обеспечения является инженерное решение, основанное на объеме, стоимости, мощности, сложности и многие другие факторы.

Растет внимание к технологии SDR с программно-определяемыми сетями (SDN), где последняя основана только на адаптации более высоких уровней связи к существующей операционной среде. Это дает возможность связывать такие вещи, как изменение маршрутизации. Самовосстанавливающиеся сети.

#### 1.4 Архитектура RTL-SDR

Система связи нового поколения представляет собой новые проблемы, которые требуют решений, выходящих за рамки того, что может быть достигнуто за счет оптимизации отдельных устройств. Интеграция большего количества программного обеспечения управления и когнитивных способностей к радио требует более гибкой конструкции RF по частоте и пропускной способности. Для

достижения этой точки статический фильтр должен быть удален и заменен настраиваемыми фильтрами. Аналогичным образом, концепция общей платформы позволяет сократить время разработки, сократить производственные затраты и обеспечить очень высокую совместимость между системами. Общая система платформы требует, чтобы система РФ была в состоянии обеспечить полную производительность для приложений, которые обладали ширмой различных архитектур традиционного дополнения. Наконец, будущие платформы подталкивают спрос на размер и мощность к новой крайности.

Портативные радиоприемники становятся эффективными и все более сложными, но для этого улучшения требуется улучшенная батарея и хорошая эффективность. Небольшие беспилотные летательные аппараты не хватает мощности для производства энергии больших самолетов и каждый милливатт не потребляется ВЧ-систем приводит к весам полезной нагрузки батареи, и, следовательно, время полета полностью сокращается. Для того, чтобы исправить эту ситуацию и быть в состоянии создать новое поколение аэрокосмических и оборонных решений, разрабатывается новая радиотехника.

После создания, супергетеродинная архитектура в настоящее время считается основой этой радиотехнической конструкции. Является ли это портативное радио, беспилотный летательный аппарат передачи данных (БПЛА) или интеллектуальный приемник сигнала, супергетеродинная архитектура одноступенчатой или двойной смешивания является общим выбором (см. рисунок 1.3). Преимущества этой конструкции очевидны: очень хорошее планирование частоты может привести к малому присутствию помех, полоса пропускания канала и селективность канала могут быть определены фильтрами промежуточной частота (IF), а распределение усиления между этапами позволяет оптимизировать коэффициент шума и линейность.

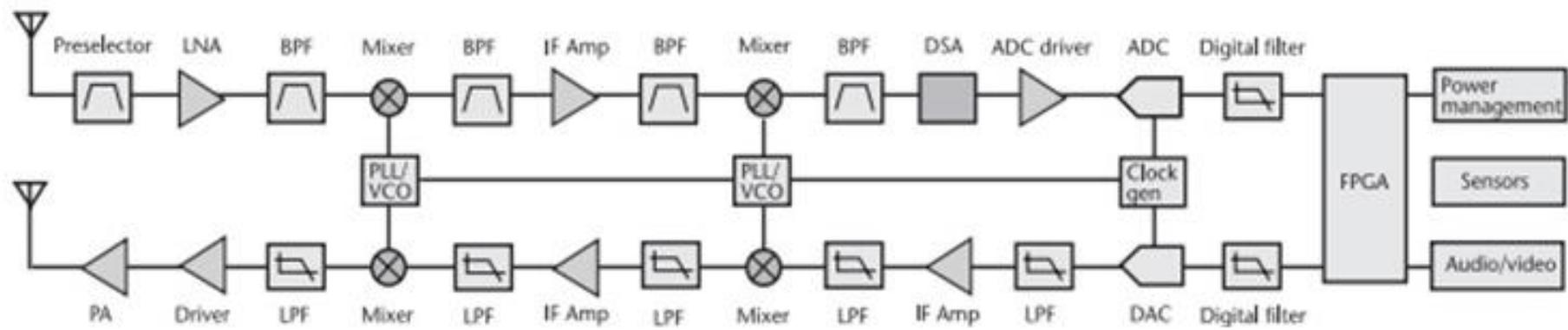


Рисунок 1.3 – Многоступенчатая супергетеродинная система приема и передачи сигналов

На протяжении более 100 лет существует одна из значительных преимуществ производительности для супергетеродина по всей сигнальной цепочке. Микроволновые и радиочастотные устройства развивают свою производительность при одновременном снижении энергопотребления. АЦП и ЦАП имеют частоту дискретизации, линейность и эффективное количество бит (ENOB). Вычислительная мощность в FPGA и DSP следовать закону Мура и увеличиваться с течением времени, что позволяет более эффективные алгоритмы, цифровая коррекция и интеграция более масштабироваться. С технологией упаковки мы испытываем низкую плотность контактов устройства при одновременном пересмотре термической обработки.

Между тем, конкретные улучшения были сделаны для устройств, и это приводит к точке снижения отдачи. В то время как компоненты RF имеют тенденцию к снижению мощности, высокопроизводительные фильтры остаются большими и часто разработаны на заказ, что делает увеличение общей стоимости системы. Кроме того, фильтры IF определяют пропускную способность аналогового канала платформы, что в конечном итоге усложняет создание общей конструкции платформы, которая может использоваться в широком диапазоне систем. Для пакетной технологии большая часть производственных линий не снизится до 0,65 мм или 0,8 мм, что просто означает, что существует ограничение на физический размер сложного устройства с большим количеством требований ввода-вывода.

Альтернативой супергетеродинной архитектуре, которая вновь появилась в качестве потенциального решения в последние годы, является архитектура нуль-IF (ZIF - нулевая промежуточная частота) (рисунок 1.3). Приемник ZIF использует смеситель одной ступени с локальным колебанием (LO) непосредственно на интересующей частотной полосе, переводя полученный сигнал вниз в базовую полосу сигналов фазы (I) и квадратуры (Q).

Добавим еще, это, выход из RTL-SDR оценки по сравнению с двумя Baseband DSP - это I и Q, как только мы их можно легко доставить в Matlab и Simulink, с помощью RTL-SDR hardware именно в этой среде, что теперь мы можем приступить к созданию концепции Baseband DSP для SDR. RTL-SDR, которые содержат 8 бит, но как только они попадают в среду обработки и редактирования, такие как Matlab и Simulink они непосредственно превращаются в числа с плавающей запятой. Подробности об архитектуре RTL-SDR будут обсуждаться в следующих основных строках нашей работы.

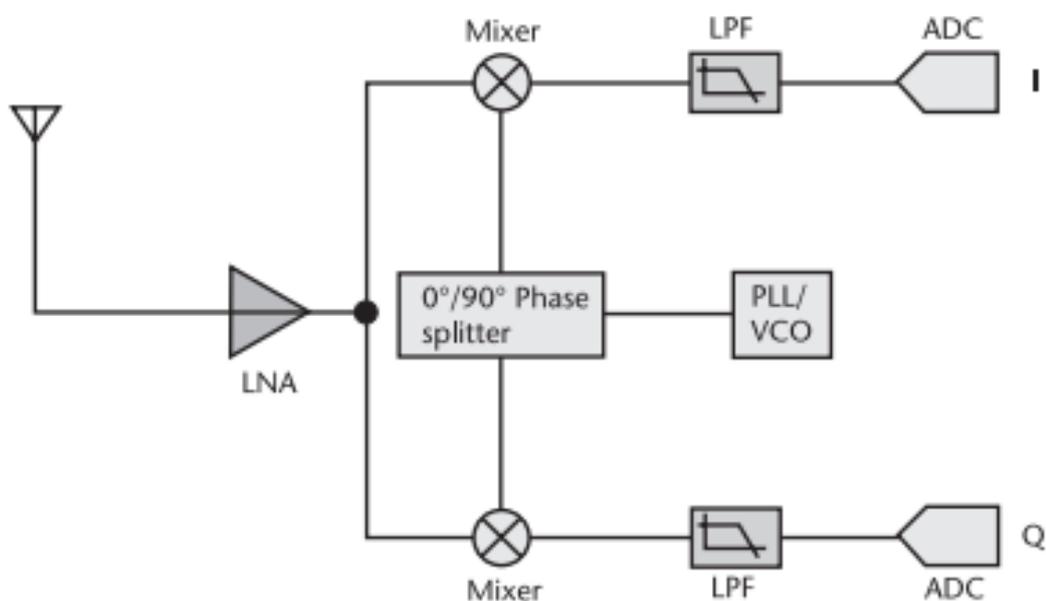


Рисунок 1.4 – Нулевая архитектура ZIF

ZIF – эта архитектура смягчает строгие требования к фильтрации супергетеродина, потому что все аналоговые фильтры проходят в базовой полосе, где фильтры намного проще в дизайне и дешевле, чем пользовательские фильтры RF/IF. АЦП и ЦАП в настоящее время работают на данных I/Q в полосе частот, так что частота дискретизации по отношению к преобразованной пропускной способности может быть уменьшена, и это приведет к значительной экономии энергии. Для многих аспектов дизайна приемопередатчики ZIF дают значительное

сокращение подкачки из-за сложности аналогового интерфейса и уменьшенного количества компонентов.

Это прямое изменение частоты в базовую полосу может принести эту возможность утечки несущей и компонента частоты изображения. Из-за реальных факторов, таких как изменение процесса и Дельта температуры в цепочке сигналов, трудно сохранить правильное смещение фазы 90 градусов между сигналами I и Q, что приводит к отклонению градиентного изображения.

Исторически сложилось так, что отсутствие баланса I / Q определенно ограничило диапазон приложений, которые лучше всего подходят для архитектуры ZIF. Это произошло из-за двух причин, а именно : во-первых, реализация архитектуры ZIF, которая будет поддерживать несоответствие одновременно в монолитном устройстве и в печатной плате. В законе Мура говорится, что интеграция архитектуры ZIF в монолитный трансивер дает путь, по которому будут следовать системы следующего поколения. Обладая цепью аналогового сигнала RF на одном куске кремния, изменение процесса будет сохранено до минимума. Цифровые блоки обработки сигналов (DSP) могут быть введены в приемопередатчик, устраняя границу между алгоритмом калибровки квадратуры и сигнальной цепи. Это действие дает как более неравномерные изменения в свопе и впоследствии дает соответствие по сравнению с супергетеродинной архитектурой для спецификаций производительности.

Устройства, такие как SDR оснащены цепью сигналов RF, аналоговый и цифровой завершает все вместе в одном CMOS-устройстве, и включает в себя цифровую обработку, чтобы применить коррекцию квадратуры и утечки несущей в режиме реального времени в все изменения процесса, частоты и температуры. Возьмем случай устройств, таких как AD9361 он основан на определении средней производительности, а также очень низкой мощности, возьмем случай передачи данных (UnmannedAerialVehicle), портативная система связи и SDR приложений с малым форм-факторов. Ad9371 был улучшен и оптимизирован для

высокопроизводительных видов, но со средней мощностью. Не говоря уже о том, что это устройство имеет хорошо различимый контроль калибровки, а также наблюдательный приемник для линейаризации усиления мощности (РА) и еще один приемник-сниффер для обнаружения пробелов.

Таким образом, у нас есть все новые возможности дизайна для другого набора приложений. Коммуникационные платформы, которые используют широкополосные волны или занимающие несмежный спектр, теперь могут быть включены в гораздо меньший форм-фактор.

### 1.5 Обработка сигналов в RTL-SDR

Микроэлектронные компании эволюционировали очень быстро за последние шесть десятилетий, с ними большой толчок эволюции в микропроцессорах, что позволило много приложений, которые мы считаем само собой разумеющимся каждый день. Отдельно закон Мура указывает, что число транзисторов в интегральной схеме удваивается примерно каждые два года, что впоследствии достигает производительности микропроцессорных систем, таких как, например, скорость обработки и память. Область каждой компании, которая занимается микроэлектроникой, в конечном итоге действует замечательно за последние полвека является сектор цифровых систем связи, где микропроцессорные системы были более востребованы в создании цифрового приемопередатчика, таким образом, дает ему эту универсальность портативной мощности и связи, которые могут действовать на все большее число операторов. Эти последние разработки в области микроэлектроники привели к рождению программно-определяемой радиотехники (SDR). В базовой радиосвязи функциональность может быть полностью помещена в цифровую логику и программное обеспечение. Это оборудование USD RTL-SDR, с одной стороны, было разработано так, что пользователь может также иметь возможность по крайней мере смотреть телевизор не только слушать радио на своем компьютере, эта версия вещи мы должны поблагодарить некоторых инженеров, которые имеют преимущество обнаружил

потенциал этой технологии. Они просто поняли, что они были в состоянии изменить принцип, который должен предоставить антенне также возможность захвата 25 МГц на 1,75 ГГц, создавая 8-битные образцы данных I и Q на программируемой частоте дискретизации базовой полосы.

Существуют различные типы микропроцессорных систем для реализации SDR, в том числе: многоцелевой микропроцессор регулярно используются в реализации SDR и прототипов по причине их высокого уровня гибкости в отношении перенастройки, так же для их концепции реализации средств рассмотреть.

Цифровые сигнальные процессоры (DSP) используются только в математических расчетах, создает новые цифровые коммуникационные модули могут быть выполнены с относительной легкостью, и в конце концов этот процессор является совершенно энергоэффективным (например, DSP используются в сотовых телефонах). С одной стороны, DSP не раз лучше разместить их для интенсивных вычислительных процессов и может быть намного медленнее.

Программируемые логические схемы (FPGA) эффективны для пользовательских приложений обработки цифрового сигнала, поскольку они имеют эту возможность вводить пользовательские алгоритмы и параллельные дополнения.

Графические процессоры (GPU) являются очень мощными в компьютерной области, эти процессоры были доведены до очень высоких уровней производительности. Глядя на последние десять лет, эта технология настолько развилась, что мы находим его даже в программируемых архитектур à общего назначения, а также использовать для широкого спектра неграфических приложений. Оборудование среди других технологий, оснащенных графическим процессором, поставляемое такими производителями, как NVIDIA, обеспечивает работу в два-десять раз выше, чем альтернативные только процессоры (CPU).

Библиотеки , оснащенные графическим процессором для линейной алгебры, обработки изображений и видео, отвергают основы будущих программно-определяемых радиоприемников для работы в этих типах архитектур.

Существуют новые, еще более продвинутые методы для вставки приложений обработки сигнала на различных аппаратных средствах. Проблема возникает на уровне, где реинезависимо от того, какой материалвыбирает для запуска алгоритма, этот материалы методология развития будет поддерживаться в течение 5 лет. Ничто не мешает нам разрабатывать основные программные приемники SDR, которые в режиме реального времени работают без каких-либо проблем на простом или любом высокоскоростном вычислительном процессоре. Вот почему с помощью Matlab и Simulink мы теперь в состоянии создать для себя много разновидностей систем, которые будут в состоянии излучать сигналы, используя те же радиосигналы, которые мы знаем, в то же время наблюдать прием радиосигналов, которые могут быть сгенерированы и переданы локально.

## 1.6 Программное обеспечение для RTL-SDR

Как мы уже говорили в подразделе 1.2, на их базовом уровне, большинство SDR платформ, конвертируют ВЧ-сигналы непосредственно в цифровой базовой полосе, используя средства, определенные в программном обеспечении для методов модуляции и демодуляции для передачи данных реального мира.

Типичным образом, радио может быть настроен для захвата центральной частоты, частоты дискретизации, полосы пропускания и других параметров, чтобы обеспечить передачу и прием сигналов интереса. Из-за этого забываются методы модуляции и демодуляции, которые были сделаны с использованием двухэтапного процесса развития.

Обеспечение роста, улучшения и оптимизации алгоритмов модуляции и демодуляции для конкретной частоты дискретизации, полосы пропускания и среды. Все это происходит на хост-ПК, где отладка и визуализациянамного проще.

На этом уровне расцвета модуляция и демодуляция RF выполняются на хосте, что дает большую гибкость для экспериментов и тестирования идей алгоритмов.

Рассмотрим алгоритм, который можно включить в плавающий язык высокого уровня и кодировать в производственной среде, принимая во внимание производственные компромиссы размера, веса, мощности и цены (своп) продукта. Эти платформы будут вполне определенными программным обеспечением когда бортовое оборудование и процессор который интегрирован программы для того чтобы унести цифровые связи, который нужно определить к применению и с функциями обработки сигнала.

Обычно это основано исключительно на первом алгоритмическом шаге процесса разработки SDR, а второй, с другой стороны, говорит о производстве точки, которую мы не знаем, чтобы выделить при исследовании потока разработки. Если ваша цель состоит только в том, чтобы продвигать статью и никогда не иметь пути к функциональному прототипу, необходимо сохранить полный процесс разработки, чтобы он был достигнут.

Есть шаги для достижения этих целей, первый шаг является то, что удобный механизм для захвата данных для анализа сигнала и разработки алгоритмов, которые будут заниматься обработкой обработки сигналов. Как только это будет сделано, необходимо иметь надежное программное обеспечение на своем ПК для разработки и тестирования различных функций передачи и обработки цифрового сигнала в системе связи.

Сегодня у нас есть программное обеспечение, которое полностью соответствует нашим ожиданиям, это MATLAB от MathWorks. MATLAB-это техническое программное обеспечение для компьютера и имеет язык программирования, позволяющий легко создавать отличные механизмы визуализации. Продукт в том, что мы можем иметь, которые CommunicationsSystemsToolbox, которая с ним приносит добавив алгоритмы физического уровня модели каналов, базовые модели и подключения

оборудования-SDR для приема и передачи сигналов в прямом эфире, MATLAB-это мультиплатформенная (Windows, Linux, MAC), который поддерживает многие радио Фронт-эндос сильно продавать. Использование MATLAB в качестве программного обеспечения согласовывает инкрементный и интерактивный рабочий процесс разработки. SDR состоит либо из:

- алгоритмы и проверка с моделированием на уровне ссылок;
- проверка алгоритма с сигналами, которая напрямую использует Conexión доступного оборудования SDR.

MathWorks также предлагает нам Simulink, который представляет собой среду реального времени для выполнения моделирования системы и автоматической генерации кода для аппаратной реализации. Это позволяет разработчику радио, чтобы иметь возможность продолжить второй этап развития производства.

Возможности, которыми обладает Simulink, приводят к пути к производству:

- разработка и проверка точной аппаратной модели;
- создание аппаратного прототипа SDR, который может использовать автоматическую генерацию кода HDL и C;
- проверка модели относительно проверенной модели;
- развертывание реализации на производственном оборудовании SDR.

Мы подчеркиваем тот факт, что Simulink можно игнорировать в этих последних текстах, поэтому наличие одного места дизайна на производстве очень важно и не следует упускать из виду тех, кто действительно имеет это желание работать с производственным радио.

Упоминание о том, что существует архитектура программного обеспечения SDR, известная под названием GNU Radio, которая представляет собой набор инструментов для разработки свободного программного обеспечения, который дает вам блоки обработки сигналов для реализации радиоприемников и систем

обработки сигналов, не определяющих программное обеспечение. Мы можем использовать его с помощью внешнего радиочастотного оборудования для создания программно-определяемого радио или без аппаратного обеспечения в имитационной среде. Такая процедура почти распространена в любительских, академических и коммерческих кругах, чтобы протянуть руку forte как для исследований в lescommunications области беспроводной связи и реальных радиосистем.

Внутри радио GNU, например, существует множество библиотек C++, которая моделирует различные цифровые коммуникации и алгоритмы обработки цифровых сигналов, которые настраивают и программируют с помощью SWIG и Python (инструмент разработки программного обеспечения, который связывает программы, написанные на C и C++ с различными языками программирования высокого уровня, включая Python). Эти жанры библиотек предоставляются сообществом с открытым исходным кодом и свободно совместно со всеми.

Создателям также пришлось прибегать к различным разнообразиям инструментов, включая MATLAB, Simulink, GNU Radio в своих исследованиях, разработке продукта и обучении в младших и старших классах. Каждый инструмент имеет свои преимущества и недостатки и может использоваться для различных целей, например, в области исследований или разработок. Авторы считали, что все программное обеспечение можно использовать в совершенном или несовершенном способе для обучения беспроводного физического уровня, хотя предпосылки для каждого инструмента различны. Для этого их, которые выбирают путь радио GNU, требование, чтобы иметь практические знания Python, Linux, C++ и SWIG понятия очень просят. В то время как это является общим для человека, изучающего информатику, это не то же самое для другого студента по коммуникациям, и просить человека изучить инструмент в то же время, что теория коммуникаций может быть как вызов для него. Благодаря уже существующим блокам GNU Radio мы можем обойти требования к пониманию C++ и Python, но другие способы, такие как разборка и эксперименты с фундаментальной теорией

коммуникаций, будут потеряны, потому что новый ученик будет использовать только то, что уже разработано другим, с возможно понимание того, что он делает. Эта же забота может также встретиться с Simulink ; он также considéréсчитается очень мощным инструментом, с большим количеством блоков уже предназначены для восстановления и синхронизации времени перевозчика. То есть использование этих блоков не поможет студенту понять, что происходит внутри блоков, и студент будет знать пробелы, чтобы понять, как настроить блоки в случае возникновения ситуации.

Вот почему MATLAB считается очень продвинутой средой, потому что это кросс-платформенная среда, позволяющая моделировать SDR, и все блоки - это скрипты MATLAB, к которым можно легко получить доступ. Таким образом, студент ризучит целый алгоритм, код которого установлена MATLAB, сделает это, не омрачая теорию коммуникаций. Почему наш следующий пункт мы еще расскажем о преимуществах, как можно выполнять различные операции с программным обеспечением MATLAB.

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Квадратурная модуляция и демодуляция в вещественной форме

Носителем информации в радиосистемах является радиосигнал. В природе встречаются только вещественные сигналы, однако для удобства математического представления процессов модуляции и демодуляции квадратурных сигналов используют комплексные сигналы.

Квадратурный сигнал образуется из двух независимых информационных сигналов, один из которых описывается вещественной частью и является синфазной составляющей I, а другой описывается мнимой частью и является квадратурной составляющей Q данного комплексного сигнала. Рассмотрим процесс квадратурной модуляции и демодуляции в вещественной и комплексной формах.

Пусть дан информационный сигнал с несущей частотой  $f_b$ . Ширина полосы этого сигнала будет равна  $f_b$ . Для передачи этого сигнала потребуется канал связи шириной полосы  $2f_b$ .

Чтобы более эффективно использовать полосу частот передачу двух информационных сигналов шириной  $f_b$  осуществляют на одной несущей частоте при помощи синфазной и квадратурной составляющих, сдвинутых относительно друг друга на  $90^\circ$ . Схема квадратурной модуляции и демодуляции изображена на рисунке 2.1:

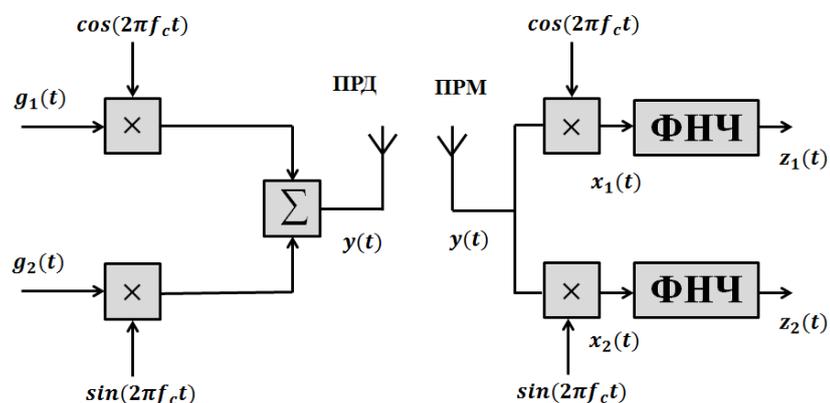


Рисунок 2.1 – Схема квадратурной модуляции и демодуляции

Пусть есть два независимых информационных сигнала  $g_1(t)$  и  $g_2(t)$ . Синфазная составляющая получается путем перемножения сигнала  $g_1(t)$  и несущей  $\cos(2\pi f_c t)$ , а квадратурная составляющая – перемножением сигнала  $g_2(t)$  и несущей  $\cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right) = \sin(2\pi f_c t)$ . Тогда, квадратурно-модулированный сигнал запишется следующим образом (1):

$$y(t) = g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - g_2(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

Пусть сигнал  $y(t)$  демодулируется опорным колебанием, частота и фаза которого в точности повторяют модулированный сигнал. Тогда, в результате процесса демодуляции синфазной составляющей получаем:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t) \cos(2\pi f_c t) = \\ &= [(g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - g_2(t) \sin(2\pi f_c t)) \cos(2\pi f_c t)] = \\ &= \frac{1}{2} g_1(t) + \frac{1}{2} [g_1(t) \cos(4\pi f_c t) - g_2(t) \sin(4\pi f_c t)]. \end{aligned}$$

После прохождения через фильтр нижних частот (ФНЧ, или LPF – LowpassFilter), выходной сигнал имеет следующий вид (2):

$$z_1(t) = \text{LPF}\{x_1(t)\} = \frac{1}{2} g_1(t) \quad (2)$$

В результате демодуляции квадратурной составляющей получаем:

$$\begin{aligned} x_2(t) &= y(t) (-\sin(2\pi f_c t)) = \\ &= [(g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - g_2(t) \sin(2\pi f_c t)) (-\sin(2\pi f_c t))] = \\ &= \frac{1}{2} g_1(t) - \frac{1}{2} [g_1(t) \sin(4\pi f_c t) + g_2(t) \cos(4\pi f_c t)] \end{aligned}$$

После прохождения через ФНЧ, выходной сигнал имеет следующий вид (3):

$$z_2(t) = \text{LPF}\{x_2(t)\} = \frac{1}{2}g_2(t) \quad (3)$$

Таким образом можно сделать вывод, что при квадратурной модуляции без фазовых сдвигов амплитуда информационного сигнала уменьшается в 2 раза. Однако при этом не учитывается коэффициент модуляции, который даст еще большее уменьшение амплитуды модулированного сигнала

Рассмотрим теперь процесс модуляции и демодуляции сигналов для ситуации, когда модулирующее и демодулирующее опорное колебание отличается на величину некоего фазового сдвига  $\theta$ . Структурная схема данного процесса представлена на рисунке 2.2:

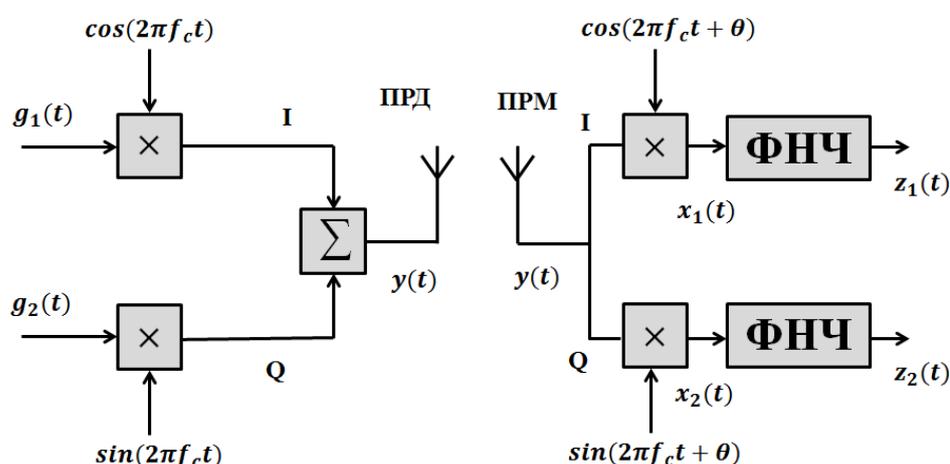


Рисунок 2.2 – Процесс модуляции и демодуляции при фазовом сдвиге

Зная, как выглядит квадратурно-модулированный сигнал (1) и опорные колебания мы можем записать сигнал на выходе демодулятора. Рассмотрим демодуляцию синфазной составляющей:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) = \\ &= [(g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - g_2(t) \sin(2\pi f_c t)) \cos(2\pi f_c t + \theta)] = \\ &= \frac{1}{2} [g_1(t) \cos(\theta) + g_2(t) \sin(\theta)] + \frac{1}{2} [g_1(t) \cos(4\pi f_c t + \theta) - g_2(t) \sin(4\pi f_c t + \theta)] \end{aligned}$$

Сигнал на выходе ФНЧ будет равен (4):

$$z_1(t) = \text{LPF}\{x_1(t)\} = \frac{1}{2} [g_1(t) \cos(\theta) + g_2(t) \sin(\theta)] \quad (4)$$

Рассмотрим демодуляцию квадратурной составляющей:

$$\begin{aligned}
 x_2(t) &= y(t) (-\sin(2\pi f_c t + \theta)) = \\
 &= [(g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - g_2(t) \sin(2\pi f_c t))(-\sin(2\pi f_c t + \theta))] = \\
 &= \frac{1}{2} [-g_1(t) \cos(\theta) + g_2(t) \sin(\theta)] - \frac{1}{2} [g_1(t) \sin(4\pi f_c t + \theta) + g_2(t) \cos(4\pi f_c t + \theta)]
 \end{aligned}$$

Сигнал на выходе ФНЧ будет равен (5):

$$z_2(t) = \text{LPF}\{x_2(t)\} = \frac{1}{2} [-g_1(t) \cos(\theta) + g_2(t) \sin(\theta)] \quad (5)$$

Таким образом, если модулирующее и демодулирующее опорное колебание различается на величину фазового сдвига  $\theta$ , то синфазный и квадратурный сигналы на выходе демодулятора представляют собой комбинации исходных информационных сигналов.

## 2.2 Модуляция и демодуляция сигналов в комплексной форме

Рассмотрим теперь процесс модуляции и демодуляции комплексных сигналов. Использование комплексных сигналов позволяет упростить как саму схему модуляции и демодуляции, так и их математическое представление.

Схема модуляции и демодуляции комплексных сигналов изображена на рисунке 2.3:

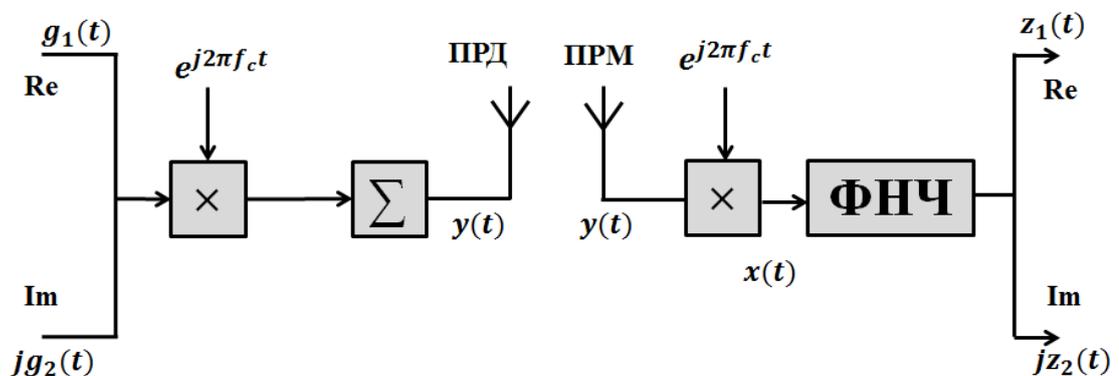


Рисунок 2.3 – Модуляция и демодуляция комплексных сигналов

Пусть  $g(t)$  – комплексный сигнал, состоящий из вещественной  $g_1(t)$  и комплексной  $g_2(t)$  частей (6):

$$g(t) = g_1(t) + jg_2(t) \quad (6)$$

Здесь  $g_1(t)$  – сигнал синфазной составляющей, а  $g_2(t)$  – сигнал квадратурной составляющей квадратурно-модулированного сигнала  $y(t)$ . Пусть  $e^{j2\pi f_c t} = \cos(2\pi f_c t) + j\sin(2\pi f_c t)$  – комплексная экспонента несущей частоты. Тогда комплексный модулированный сигнал выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} v(t) &= g(t)e^{j2\pi f_c t} = [g_1(t) + jg_2(t)] * [\cos(2\pi f_c t) + j\sin(2\pi f_c t)] = \\ &= [g_1(t)\cos(2\pi f_c t) - g_2(t)\sin(2\pi f_c t)] + j[g_1(t)\sin(2\pi f_c t) + g_2(t)\cos(2\pi f_c t)] \end{aligned}$$

Вещественная часть комплексно-модулированного сигнала представляет собой вещественный квадратурно-модулированный сигнал:

$$\operatorname{Re}(v(t)) = [g_1(t)\cos(2\pi f_c t) - g_2(t)\sin(2\pi f_c t)] = y(t)$$

Пусть  $y(t)$  демодулируется опорным колебанием, частота которого с обратным знаком в точности повторяет модулированный сигнал. Тогда получаем:

$$\begin{aligned} x(t) &= y(t)e^{-j2\pi f_c t} = \\ &= [g_1(t)\cos(2\pi f_c t) - g_2(t)\sin(2\pi f_c t)] * [\cos(2\pi f_c t) + j\sin(2\pi f_c t)] = \\ &= \frac{1}{2}g_1(t)[1 + \cos(4\pi f_c t)] + j\frac{1}{2}g_2(t)[1 - \cos(4\pi f_c t)] - \\ &\quad - \frac{1}{2}g_2(t)\sin(4\pi f_c t) + j\frac{1}{2}g_1(t)\sin(4\pi f_c t) \end{aligned}$$

После ФНЧ получим (7):

$$z(t) = \operatorname{LPF}\{x(t)\} = \frac{1}{2}[g_1(t) + jg_2(t)] \quad (7)$$

Исходя из (5), (6) и (7) можно сделать вывод об эквивалентности вещественного и комплексного представления квадратурной модуляции и демодуляции.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда принятый сигнал демодулируется опорным колебанием, частота которого  $f_c + \Delta f$  отличается от частоты модулирующего колебания на  $\Delta f$ . Получим комплексный демодулированный сигнал:

$$x(t) = y(t)e^{-j2\pi(f_c + \Delta f)t} = [g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - g_2(t) \sin(2\pi f_c t)]e^{-j2\pi f_c t} e^{j2\pi \Delta f t}$$

Демодуляция частотным сдвигом соответствует сдвигу спектра демодулированного сигнала на  $-\Delta f$ . Для компенсации этого сдвига принятый сигнал нужно умножить на комплексную экспоненту с обратным знаком частотного сдвига, т.е. на  $e^{j2\pi \Delta f t}$ .

### 3 Практическая часть

#### 3.1 Моделирование вещественных и комплексных сигналов

Рассмотрим вещественное представление двух сигналов (8), состоящих из суммы трех гармоник и их спектры:

$$s_1(t) = 10 \cos(2\pi 70t) + 2 \cos(2\pi 200t) + \cos(2\pi 350t)$$

$$s_2(t) = 10 \cos(2\pi 78t) + 2 \cos(2\pi 206) t + \cos(2\pi 351t) \quad (8)$$

На рисунках 3.1 – 3.6 представлены: осциллограмма первого сигнала, его частотный и фазовый спектр и осциллограмма второго сигнала и его частотный и фазовый спектр:

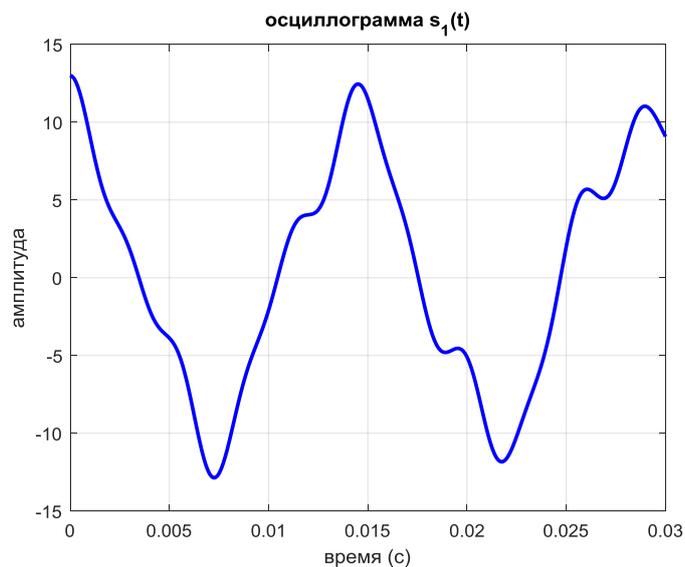


Рисунок 3.1 – Осциллограмма первого сигнала

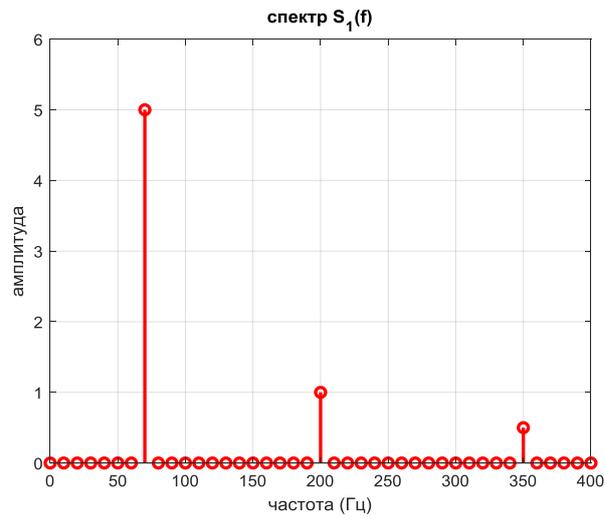


Рисунок 3.2 – Частотный спектр первого сигнала

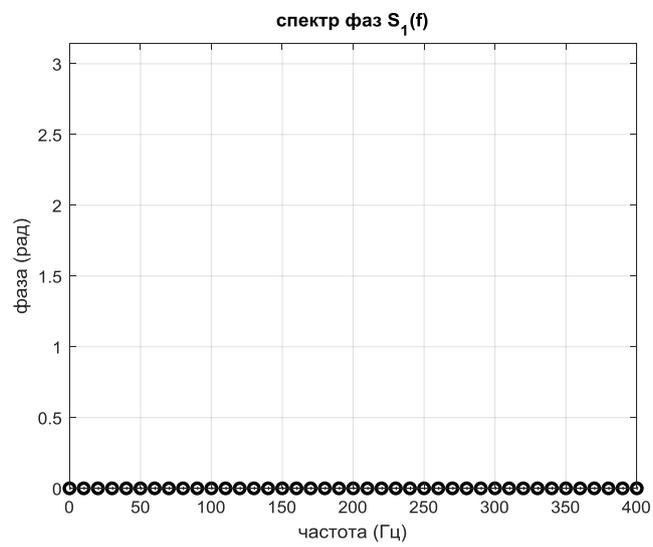


Рисунок 3.3 – Фазовый спектр первого сигнала

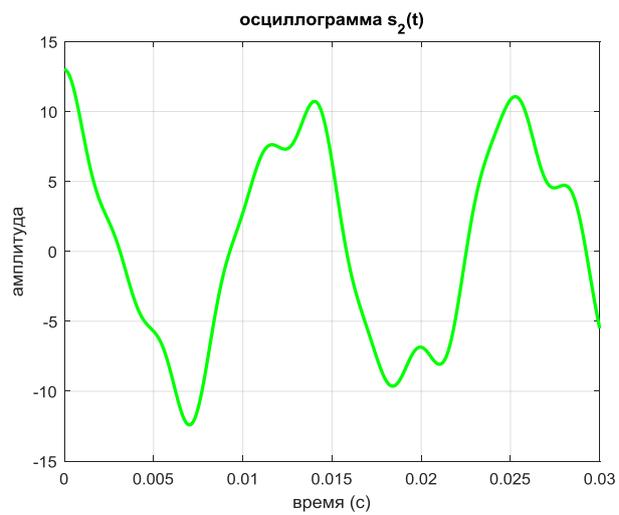


Рисунок 3.4 – Осциллограмма второго сигнала

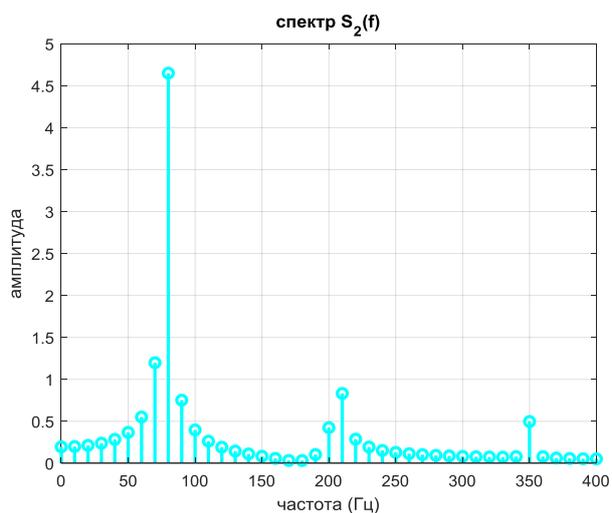


Рисунок 3.5 – Частотный спектр второго сигнала

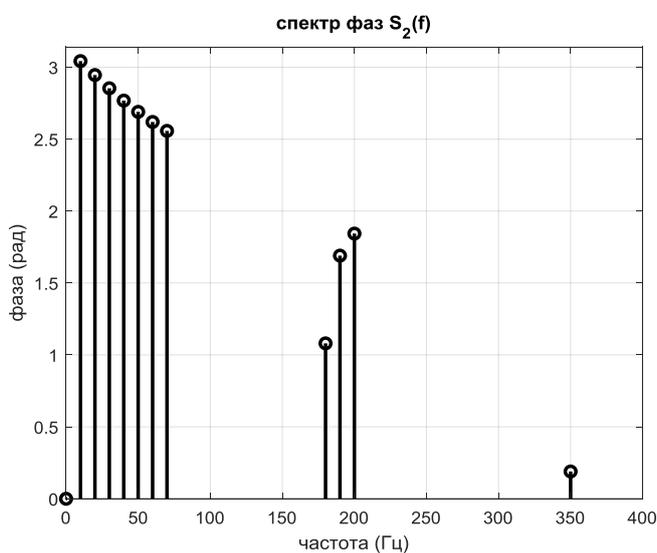


Рисунок 3.6 – Фазовый спектр второго сигнала

Рассмотрев спектры, можно сделать вывод, что составляющие сигналов, частоты которых кратны частоте дискретизации отображаются в амплитудном и фазовом спектре корректно. Сигналы, частоты которых не кратны частоте дискретизации дают искажения амплитудного и фазового спектров.

Рассмотрим представление сигнала из суммы трех гармоник в вещественной и комплексной форме. Для этого используем сигнал  $s_1(t)$  заданный выражением (8) и представим его в следующем виде (9):

$$\begin{aligned}
s_1(t) &= 10 \cos(2\pi 70t) + 2 \cos(2\pi 200t) + \cos(2\pi 350t) = \\
&= 10 \left( \frac{e^{2\pi 70t} + e^{-j2\pi 70t}}{2} \right) + 2 \left( \frac{e^{2\pi 200t} + e^{-j2\pi 200t}}{2} \right) + \left( \frac{e^{2\pi 350t} + e^{-j2\pi 350t}}{2} \right) = \\
&= 5e^{2\pi 70t} + e^{2\pi 200t} + 0,5e^{2\pi 350t} + 5e^{-j2\pi 70t} + e^{-j2\pi 200t} + 0,5e^{-j2\pi 350t} \quad (9)
\end{aligned}$$

На рисунках 3.7–3.11 представлен результат моделирования трехтонального сигнала в комплексной форме, а также фазовый спектр, частотный спектр вместе с вещественной и мнимой составляющей:

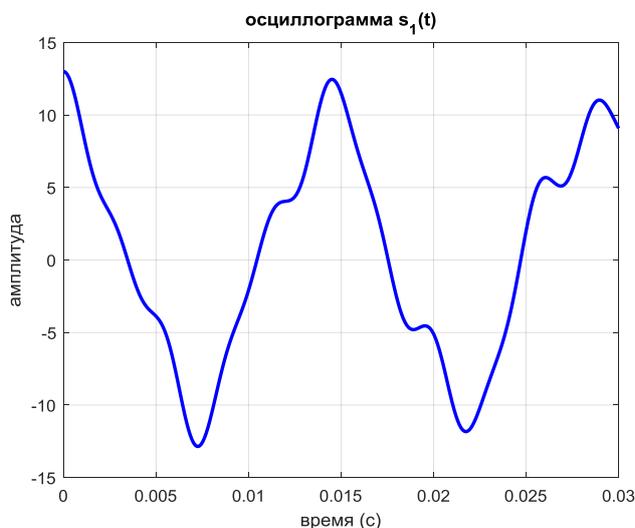


Рисунок 3.7 – Оциллограмма трехтонального комплексного сигнала

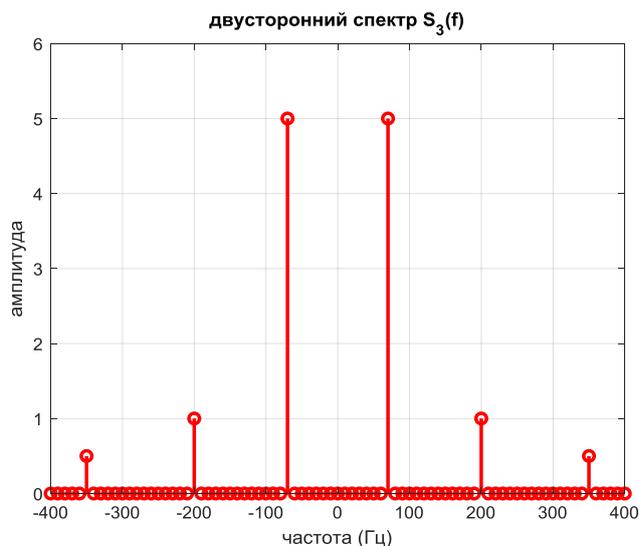


Рисунок 3.8 – Частотный спектр трехтонального сигнала

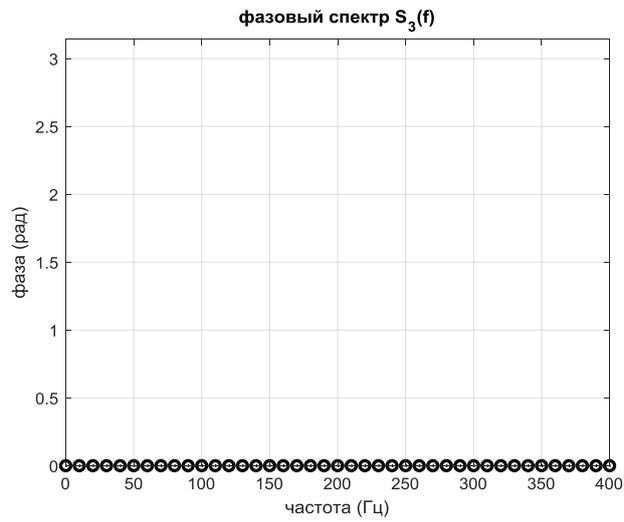


Рисунок 3.9 – Фазовый спектр трехтонального сигнала

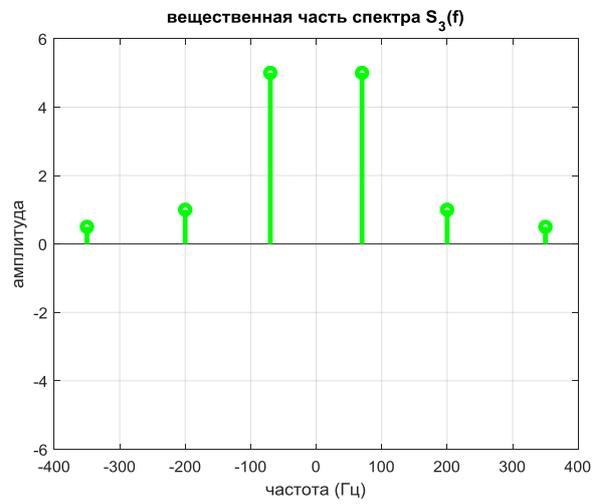


Рисунок 3.10 – Вещественная часть частотного спектра трехтонального сигнала

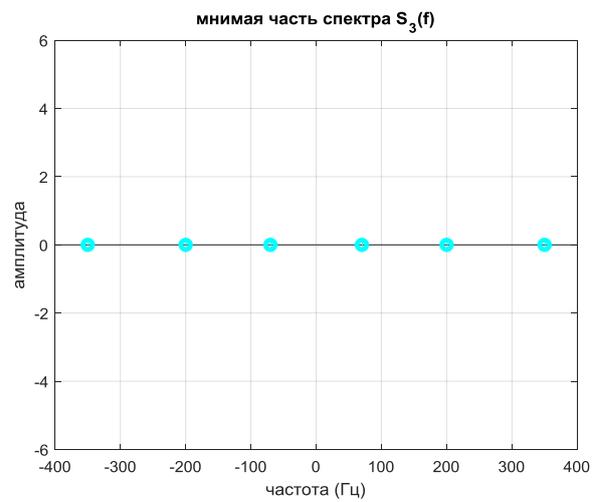


Рисунок 3.11 – Мнимая часть частотного спектра трехтонального сигнала

Сигнал, представленный в комплексной форме, отображает как вещественную часть (область положительных частот), так и мнимую часть (область отрицательных частот).

Добавим к нашему комплексному сигналу фазовые сдвиги (10):

$$s_1(t) = 10 \cos\left(2\pi 70t + \frac{\pi}{3}\right) + 2 \cos\left(2\pi 200t + \frac{\pi}{6}\right) + \cos(2\pi 350t) \quad (10)$$

Результат моделирования представлен на рисунках 3.12–3.16:

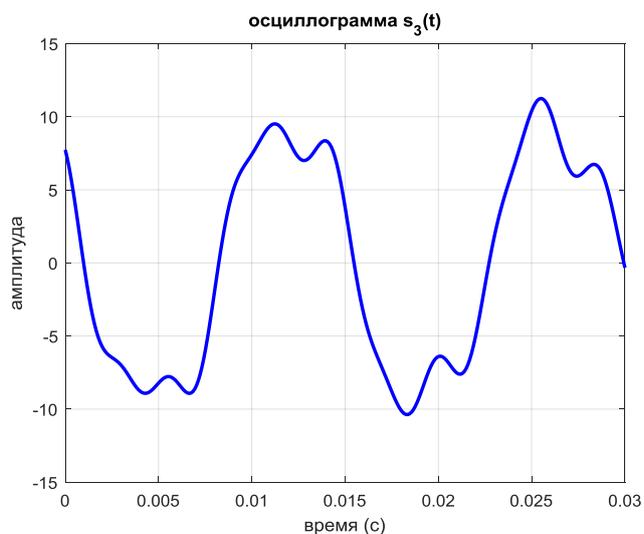


Рисунок 3.12 – Осциллограмма трехтонального комплексного сигнала с учетом фазовых сдвигов

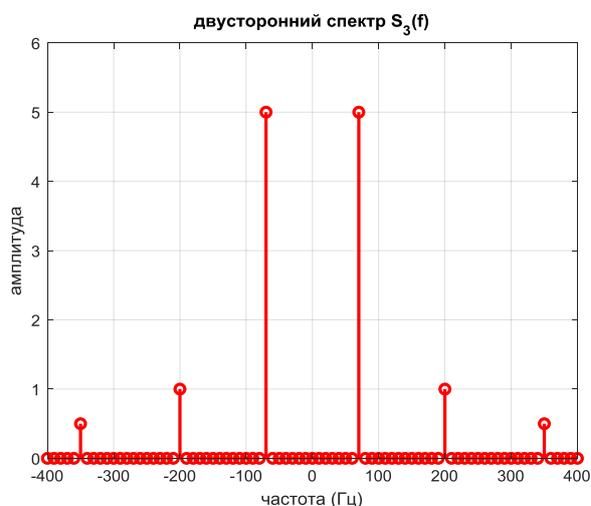


Рисунок 3.13 – Частотный спектр трехтонального сигнала

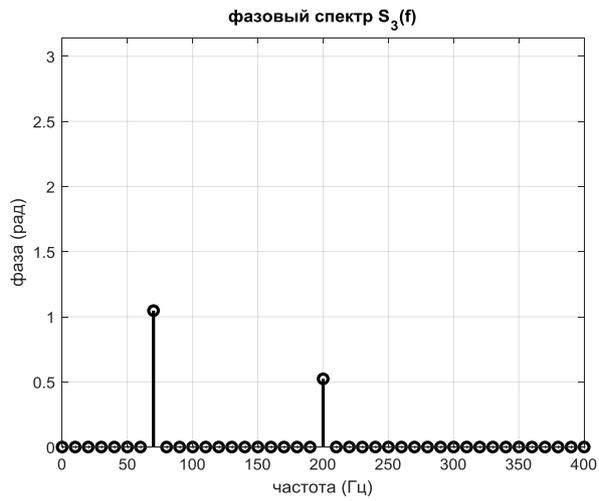


Рисунок 3.14 – Фазовый спектр трехтонального сигнала

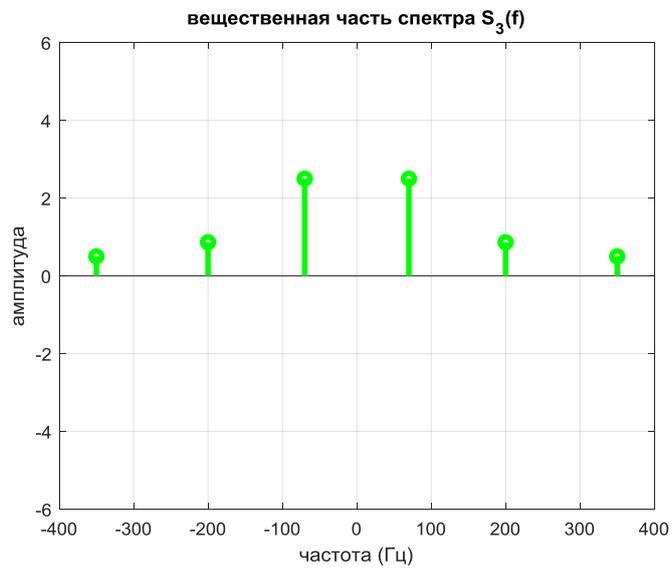


Рисунок 3.15 – Вещественная часть частотного спектра

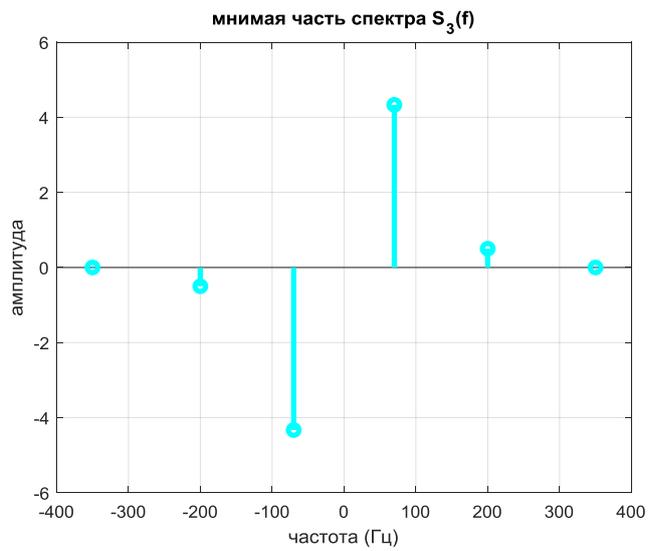


Рисунок 3.16 – Мнимая часть частотного спектра

При наличии фазовых сдвигов амплитудный спектр сигнала не изменился, а в фазовом спектре появились составляющие соответствующие искажениям. При этом в мнимой части спектра в области отрицательных частот искажения появляются с отрицательным знаком.

### 3.2 Моделирование процессов квадратурной модуляции и демодуляции

Для начала построим модель четырехтонального сигнала во временной и частотной областях. Пусть сигнал представлен выражением (11):

$$s(t) = \cos(2\pi 1000t) + 2 \cos(2\pi 2000t) + 3 \cos(2\pi 3000t) + 4 \cos(2\pi 4000t) \quad (11)$$

Для представления данного сигнала соберем схему в пакете Simulink и зададим параметры сигналов. Модель для представления сигнала изображена на рисунке 3.17:

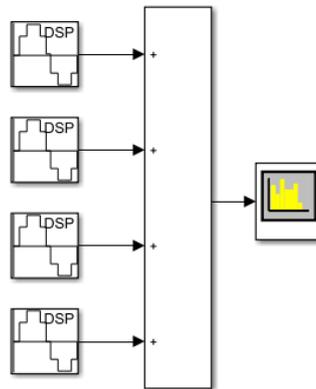


Рисунок 3.17 – Модель для представления четырехтонального сигнала

При рассмотрении спектра можно убедиться, что все частоты отображаются корректно. Спектр сигнала изображен на рисунке 3.18:

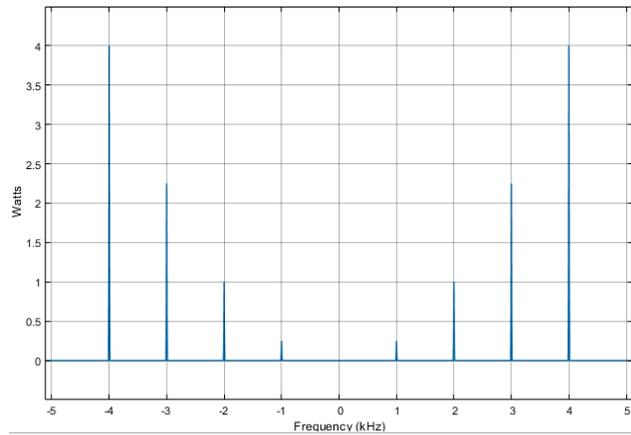


Рисунок 3.18 – Спектр четырехтонального сигнала

Рассмотрим теперь процесс переноса вещественного модулированного радиосигнала в область нулевой частоты и получение комплексного демодулированного сигнала. Пусть вещественный сигнал с частотой несущей  $f_H=1000$  Гц представлен в следующем виде (12):

$$s(t) = 8\cos(2\pi 800t) + 6\cos(2\pi 900t) + 4\cos(2\pi 1100t) + 2\cos(2\pi 1200t) \quad (12)$$

Представим сигнал в комплексной форме (13):

$$y(t) = 4e^{j2\pi 800t} + 3e^{2\pi 900t} + 2e^{2\pi 1100t} + e^{2\pi 1200t} + \\ + 4e^{-j2\pi 800t} + 3e^{-j2\pi 900t} + 2e^{-j2\pi 1100t} + e^{-j2\pi 1200t}$$

Перенос сигнала на нулевую частоту осуществляется путем умножения сигнала  $y(t)$  на  $e^{-j2\pi 1000t}$ .

В результате получим выражение (14):

$$x(t) = y(t)e^{-j2\pi 1000t} = 4e^{-j2\pi 200t} + 3e^{-j2\pi 100t} + 2e^{j2\pi 100t} + e^{j2\pi 200t} + \\ + 4e^{-j2\pi 1800t} + 3e^{-j2\pi 1900t} + 2e^{-j2\pi 2100t} + e^{-j2\pi 2200t} \quad (14)$$

После прохождения сигнала через ФНЧ получим (15):

$$z(t) = \text{LPF}\{y(t)\} = 4e^{-j2\pi 200t} + 3e^{-j2\pi 100t} + 2e^{j2\pi 100t} + e^{j2\pi 200t} \quad (15)$$

Модель, иллюстрирующая перенос сигнала на нулевую частоту представлена на рисунке 3.19:

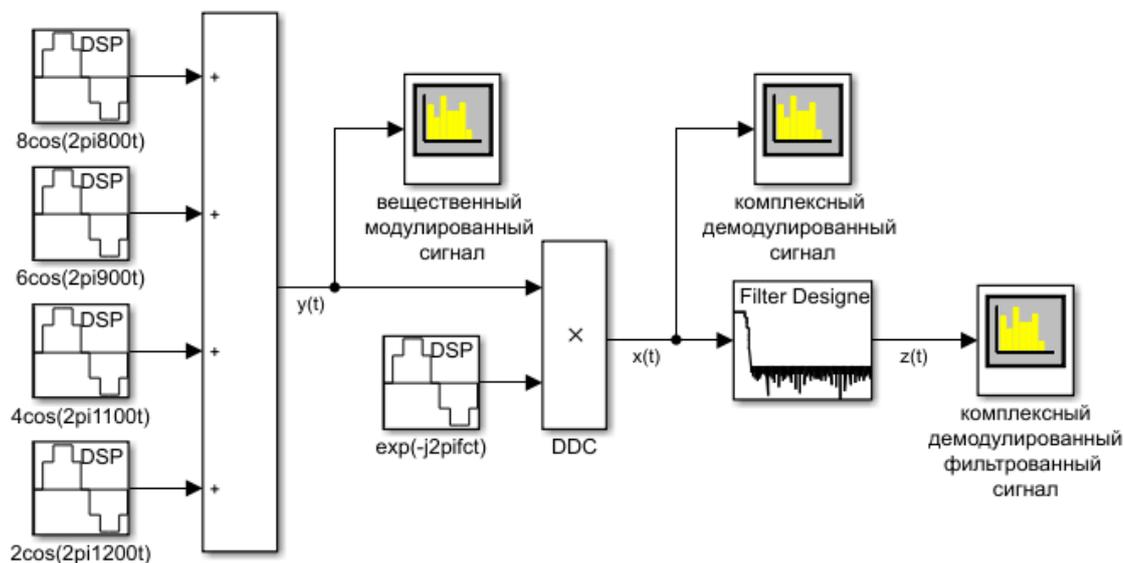


Рисунок 3.19 – Модель иллюстрации понижающего преобразования частоты

Рассмотрим спектры вещественного модулированного сигнала (рисунок 3.20), комплексного демодулированного сигнала (рисунок 3.21) и комплексного демодулированного фильтрованного сигнала (рисунок 3.22).

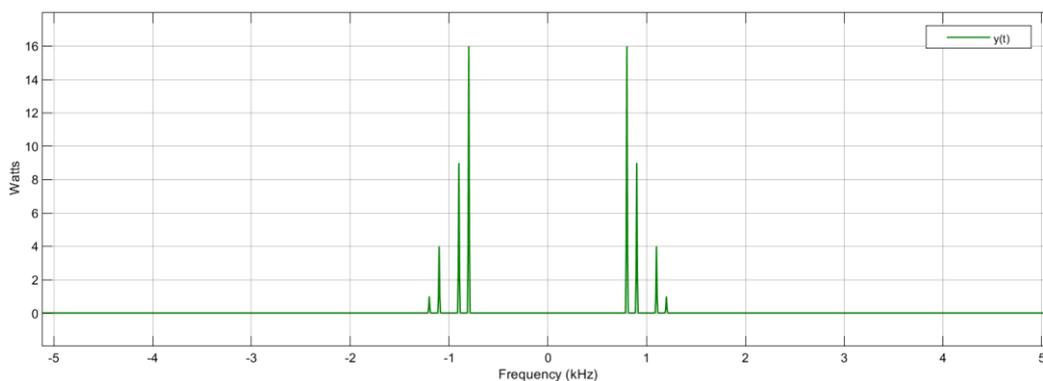


Рисунок 3.20 – Вещественный модулированный сигнал

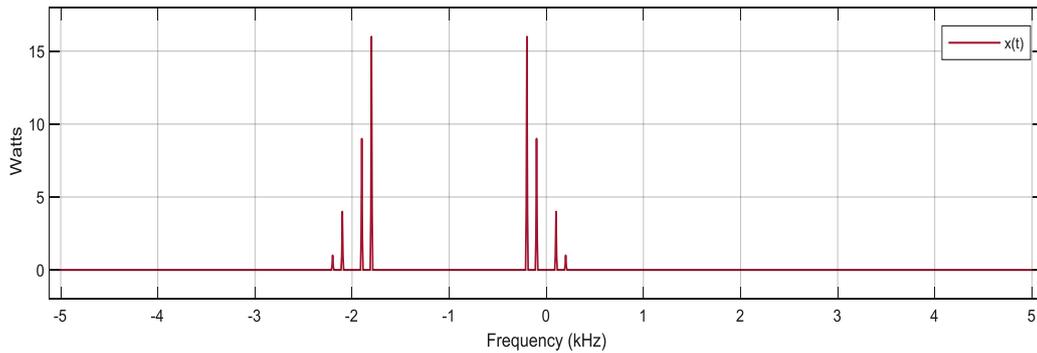


Рисунок 3.21 – Комплексный демодулированный сигнал

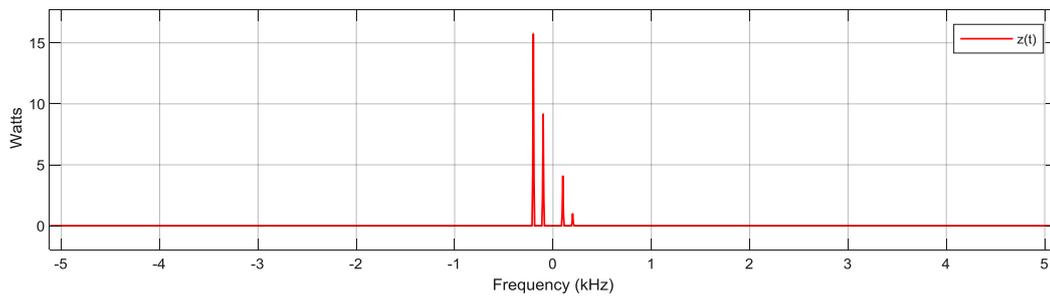


Рисунок 3.22 – Комплексный демодулированный сигнал после фильтрации

Как видно по графикам, амплитудный спектр модулированного сигнала симметричен относительно нулевой частоты, в спектре демодулированного сигнала вещественная часть перенесена на нулевую частоту, а мнимая часть отстоит от нее на величину  $2f_b = 2$  кГц. После фильтрации высокочастотная мнимая составляющая убирается из спектра сигнала.

Для рассмотрения процессов квадратурной модуляции и демодуляции вещественных и комплексных сигналов построим модель, изображенную на рисунке 3.23:

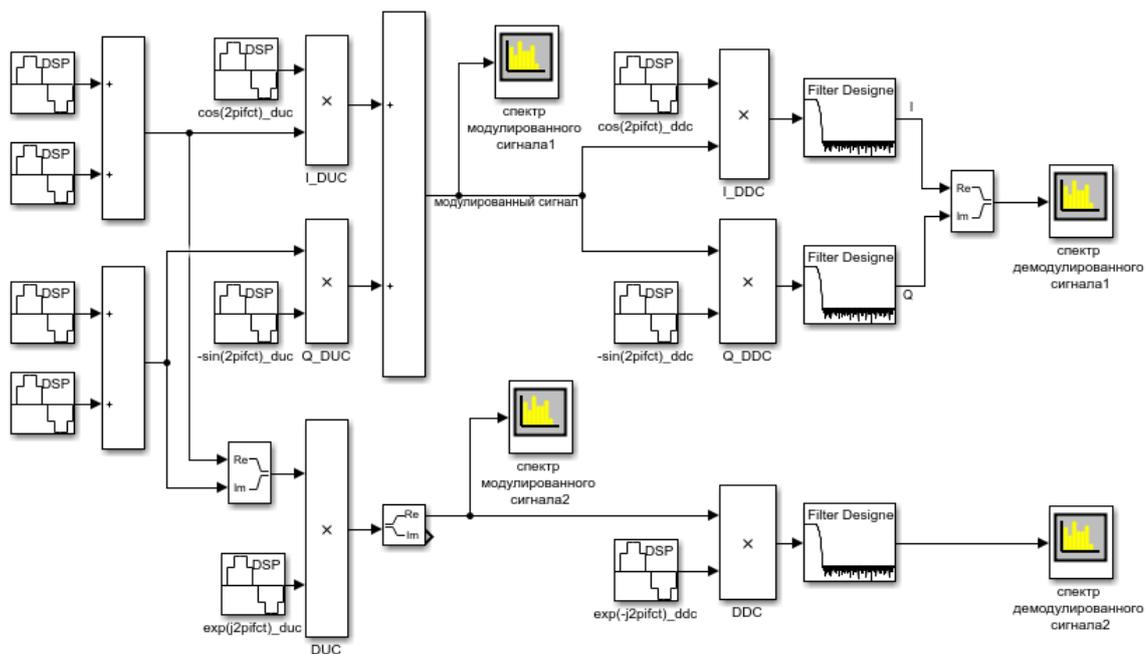


Рисунок 3.23 – Модель для иллюстрирования процессов квадратурной модуляции и демодуляции сигналов

Рассмотрим спектры модулированных и демодулированных сигналов в вещественной и комплексной формах (рисунки 3.24 – 3.27):

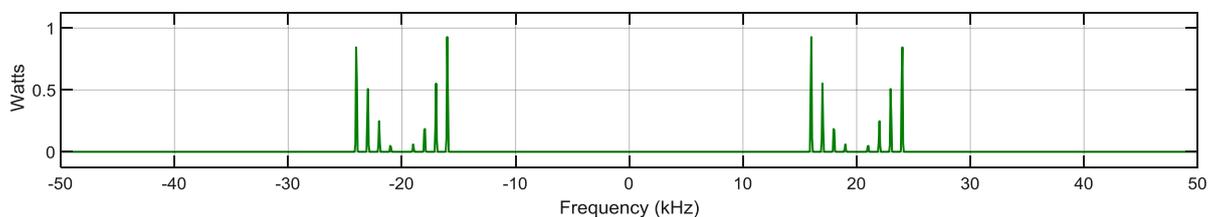


Рисунок 3.24 – Модулированный вещественный информационный сигнал 1

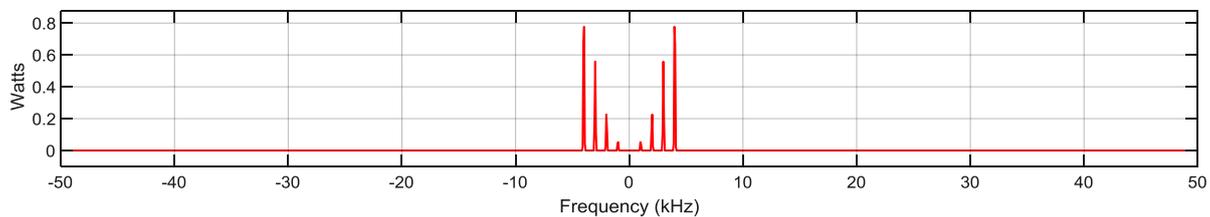


Рисунок 3.25 – Демодулированный вещественный информационный сигнал 1

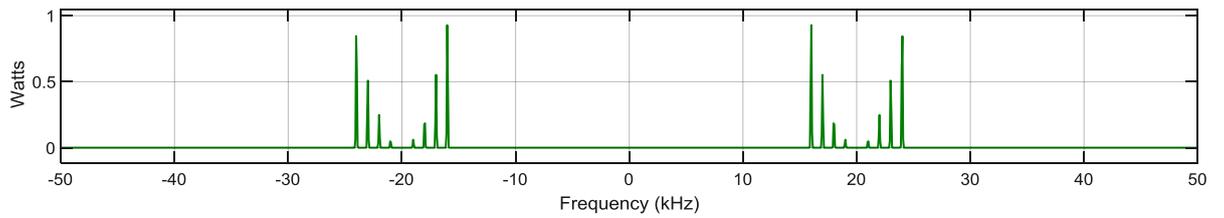


Рисунок 3.26 – Модулированный комплексный информационный сигнал 2

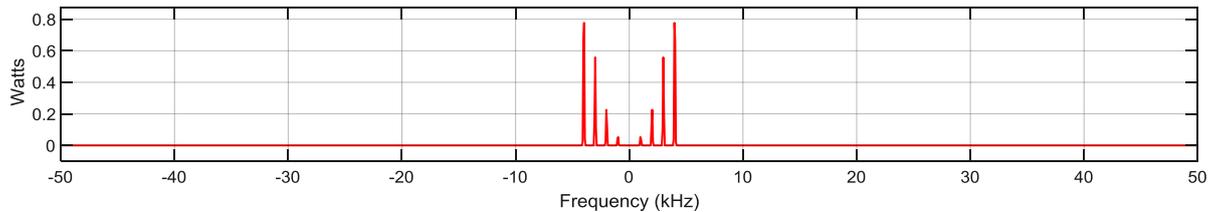


Рисунок 3.27 – Демодулированный комплексный информационный сигнал 2

Из спектрограмм видно, что вещественное и комплексное представление процессов квадратурной модуляции и демодуляции эквивалентны друг другу, при этом комплексное представление значительно проще, т.к. включает в себя меньшее число операций, а это значит его более удобно использовать в реальных SDR-приемниках.

Рассмотрим теперь процесс компенсации частотного сдвига в приемниках на основе модели, изображенной на рисунке 3.28:

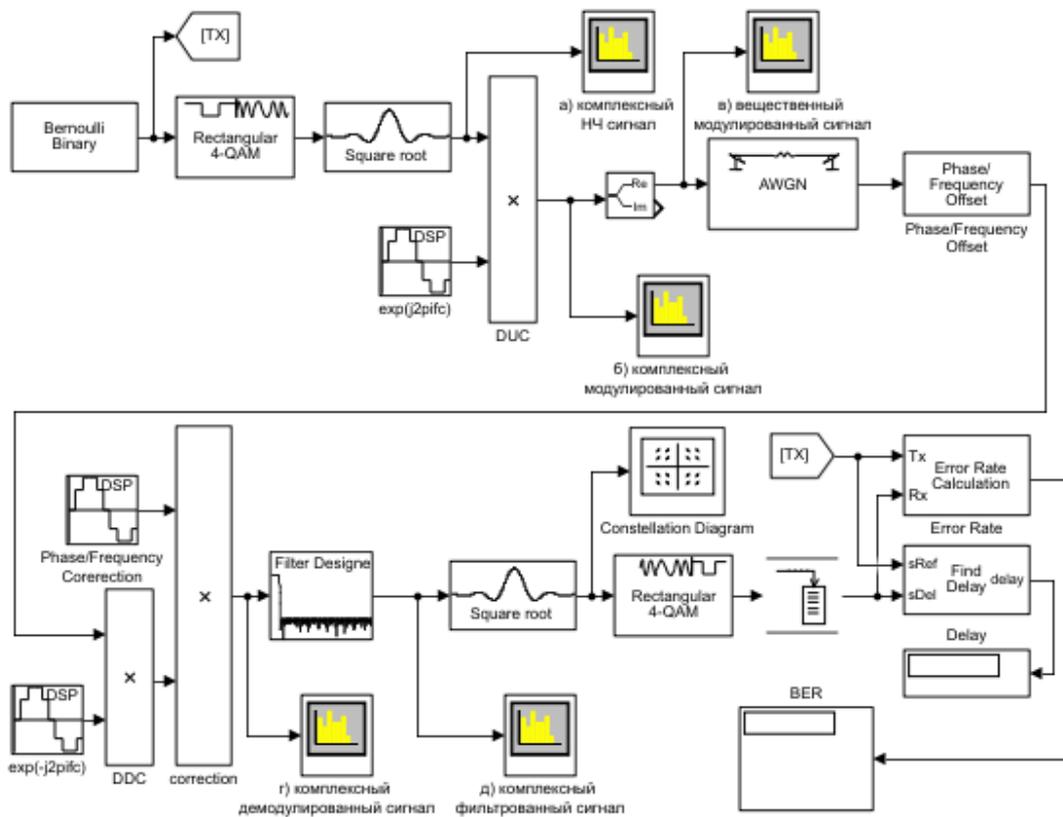


Рисунок 3.28 – Модель, иллюстрирующая квадратурную модуляцию и демодуляцию сигналов с учетом частотных сдвигов

Рассмотрим спектры комплексного информационного НЧ сигнала на нулевой частоте (рисунок 3.29), комплексного модулированного сигнала на несущей частоте (рисунок 3.30), вещественного модулированного сигнала на несущей частоте (рисунок 3.31), комплексного демодулированного сигнала после понижающего преобразования частоты (рисунок 3.32) и комплексного демодулированного сигнала после прохождения через ФНЧ (рисунок 3.33):

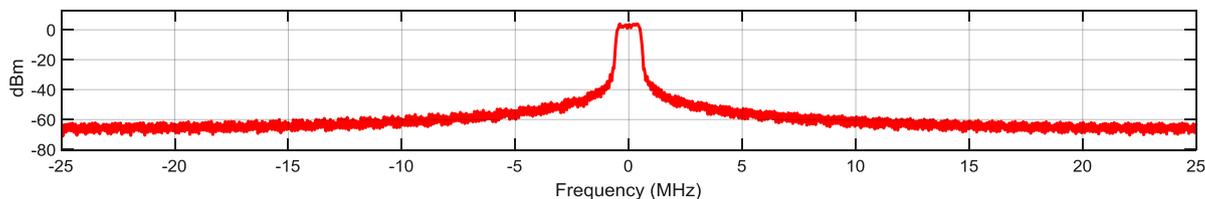


Рисунок 3.29 – Информационный НЧ-сигнал

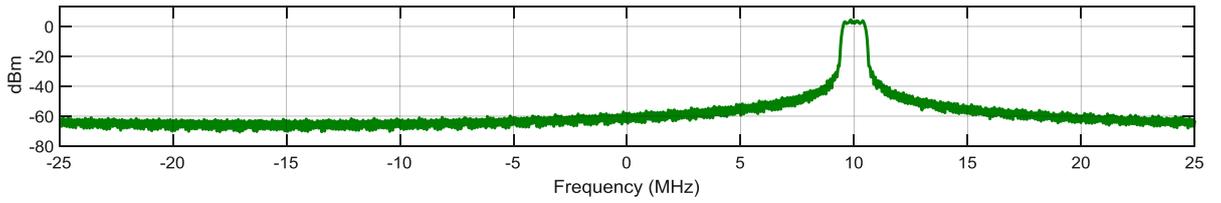


Рисунок 3.30 – Комплексный модулированный сигнал

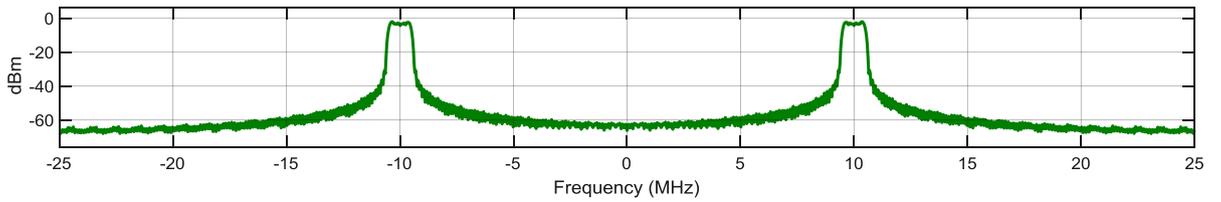


Рисунок 3.31 – Вещественный модулированный сигнал

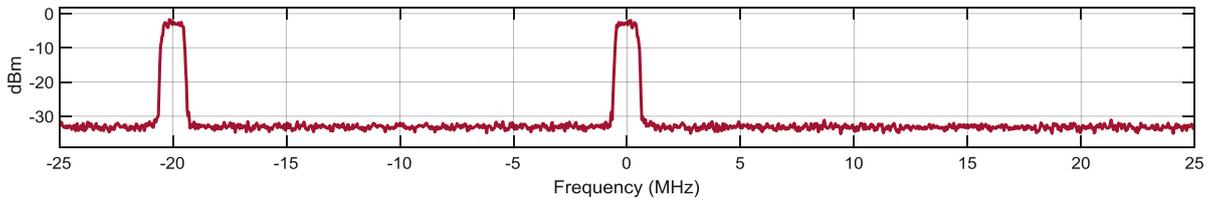


Рисунок 3.32 – Комплексный демодулированный сигнал

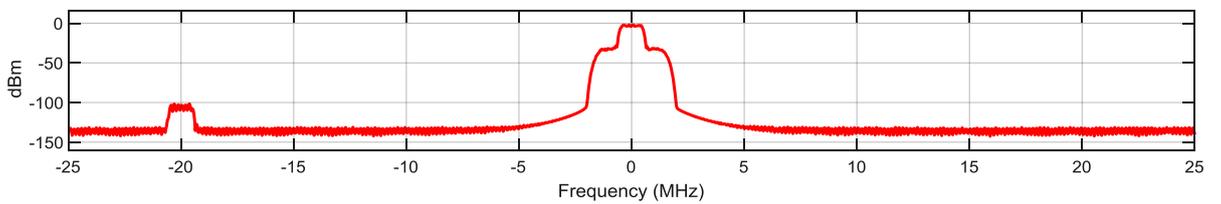


Рисунок 3.33 – Комплексный фильтрованный сигнал

На рисунке 3.34 изображен фазовый портрет принимаемого сигнала без искажений и с поворотом на  $45^\circ$ :

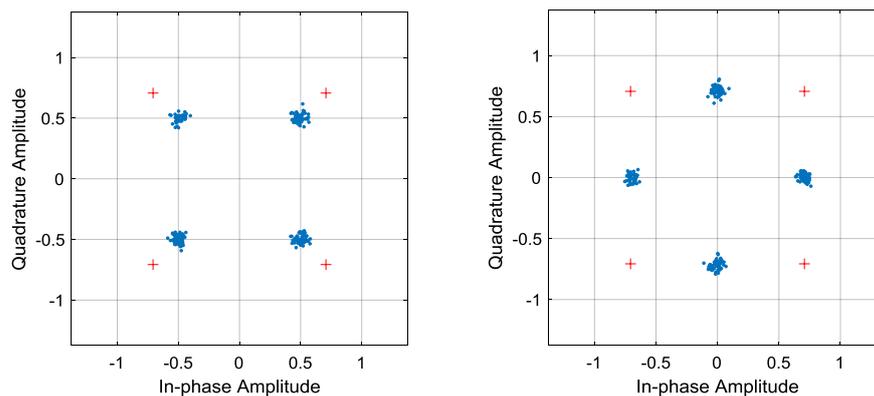


Рисунок 3.34 – Корректный фазовый портрет и фазовый портрет с поворотом на  $45^\circ$

На рисунке 3.35 изображена диаграмма, отображающая влияние частотного сдвига величиной 50 Гц:

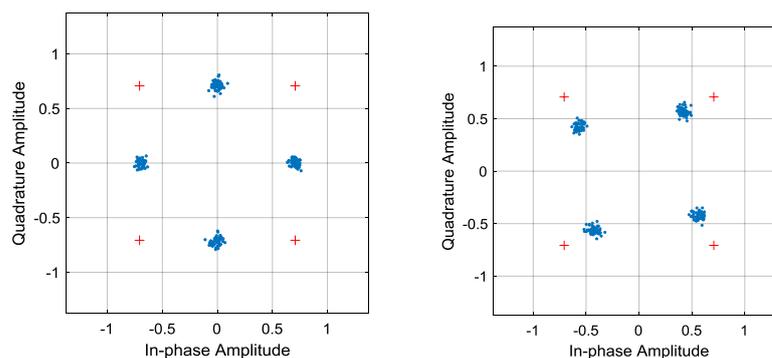


Рисунок 3.35 – Влияние частотного сдвига на принимаемый сигнал

Осциллограммы сделаны в разные моменты времени. При наличии частотного сдвига, фазовый портрет принимаемого сигнала будет вращаться в направлении часовой стрелки при отрицательном значении частотного сдвига и в противоположную сторону при его положительном значении. Скорость вращения зависит от величины частотного сдвига.

#### 4 Применение RTL-SDR для приема FM-радиостанций

Мы должны уведомить вас, что FM-это тот, который используется для модуляции коммерческой радиостанции "FM". Эти FM-сигналы точно получены путем модуляции одной фазы несущей с компьютерным сигналом. В большинстве крупных стран радиосигналы излучаются на частоте 88 и 108 МГц, с этими частотами сигналы могут распространяться на километры по всей стране. Существует высокая вероятность того, что эти радиочастоты выходят за границы одной страны, поэтому в другой стране или регионе действительно далеко точные частоты радиостанции больше не будет то же самое из-за расстояния от места передачи, даже увидеть диапазон использовать FM-станции также будет отличаться. Все, что мы говорили и комментировали в целом, теперь пришло время поговорить относительно RTL-SDR.

С RTL-SDR мы всегда требуем, чтобы подключить его к нашему компьютеру, а затем мы осуществляем наши моделирования в Matlab. С помощью программного обеспечения «SDRSharp» мы можем получить доступ к любому FM-диапазону, просто запустив наше радио RTL-SDR или нажав кнопку воспроизведения FM в графическом интерфейсе «SDRSharp», который сам по себе индивидуально будет выбирать по умолчанию несущие частоты около 100 МГц.

Или вы можете просто ввести частоту в текстовое поле, которое вы хотите, или просто переместить частоту с помощью курсора, чтобы настроить радиостанцию по вашему выбору. Никогда не откладывайте ваше конкретное географическое положение и положение вашей антенны играет большую роль в приеме FM-сигналов и сила радиостанции могут отличаться друг от друга.

Все вариации и различия, с которыми вы столкнетесь, могут быть причиной многих вещей, таких как расстояние от вашего передатчика, мощности, которую он обеспечивает для передачи сигнала. Если вы столкнетесь с аналогичной ситуацией для конкретной станции, вы будете обязаны увеличить уровень усиления, чтобы

иметь возможность хорошо улавливать станцию и визуально отличать шум от окружающего фона.

В некоторых случаях, чтобы вы не наткнулись на радиостанцию, которая имеет много окружающего шума и просит вас поднять уровень усиления, чтобы иметь эту возможность захватить радиостанцию, просто делает исследование диапазона FM, на котором вы находитесь. Этот метод позволит вам легко узнать, сколько радиостанций находится на FM-диапазоне и посмотреть, сколько функции уже без каких-либо проблем.

Сканирование FM-диапазона также позволяет увидеть по спектральной активности некоторых радиостанций, что при проявлении большего спектра вы сразу поймете, что именно на этом уровне находятся самые мощные сигналы. На приведенном ниже скриншоте представлены три типа спектра FM-радиостанции, которые уже из них даже на частоте, на которой они расположены, уже появляются мощности не знают никаких проблем с получением сигнала, а также фонового шума, этот вид спектра легче заметить в Spectrum анализировать FFT (рисунок 4.1).

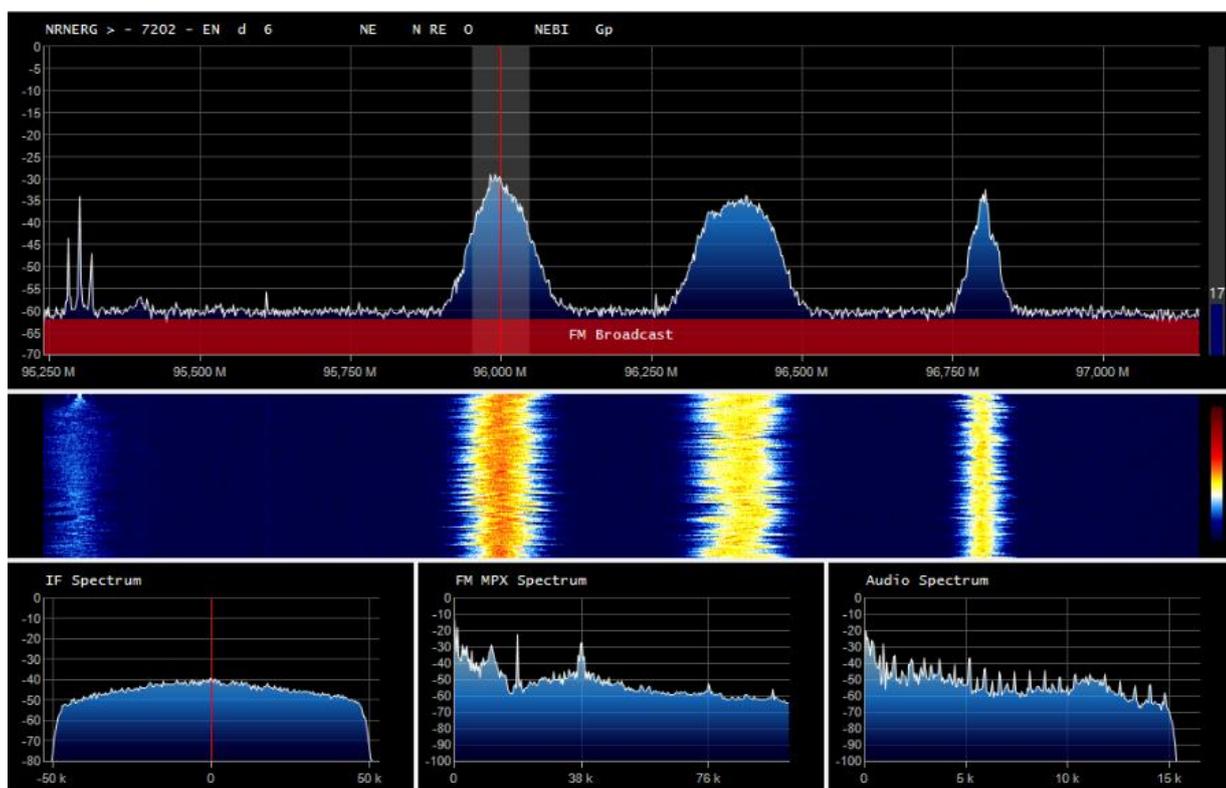


Рисунок 4.1 –Исследование спектров сигналов диапазона FM

Как мы уже упоминали в начале этого раздела, что радиосигналы получают с помощью модуляции несущей фазы, а также информационного сигнала, эта модуляция иногда приводит к изменению частоты несущей. Если вы так внимательно изучите любую радиостанцию, которую вы намеренно выбрали, есть явление, которое так замечательно, и вы должны наблюдать, это явление просто хорошо наблюдать, что самый высокий пик вашего спектра выполнять движение из стороны в сторону относительно центральной частоты выбирает.

Как изображение показывает нам так хорошо движение спектра хорошо видно только серьезно к анализатору спектра каскада, как он показывает во времени, с красным и желтым цветом в масштабе дБм (рисунок 4.2).

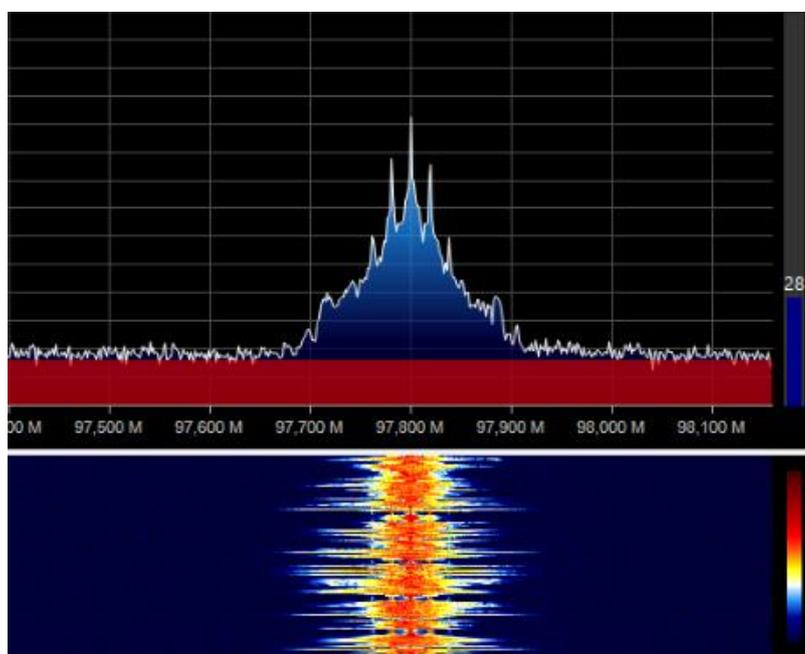


Рисунок 4.2 – Спектр сигнала относительно частоты, выбранной в анализаторе каскадного спектра

Именно по этому графику мы понимаем, как FM -сигнал можно увидеть в эфире во время их маршрутизации в точку приема, и вы всегда сможете увидеть это явление везде, где радиоактивность совершенно интенсивна в любом регионе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена технология программно-конфигурируемого радио SDR. Исследована работа устройства RTL-SDR совместно с программой Matlab / Simulink.

В ходе проведения работы были рассмотрены процессы квадратурной модуляции и демодуляции сигналов в комплексной и вещественной формах. Сняты спектрограммы вещественных и комплексных сигналов.

В SDR-приемниках основная идея заключается в том, чтобы вся обработка сигнала велась в цифровой форме. Отсюда следует вывод, что для обработки сигналов удобно использовать комплексное представление сигналов, т.к. оно проще реализуется в программном виде и при этом полностью эквивалентно вещественному представлению сигналов.

Тем не менее вещественное представление сигналов удобнее использовать в аналоговой форме и полностью отказываться от него в пользу комплексного представления сигналов не следует.

SDR-приемники уже давно реализованы в виде самостоятельных устройств. Существуют как дешевые устройства, имеющие только один канал на прием сигналов, так и более дорогие устройства имеющие каналы на прием и передачу сигналов. Чем больше каналов имеет SDR-приемник тем выше его стоимость.

Для работы с SDR-приемниками разработаны специальное ПО, которое может установить любой пользователь. В настройках программ обязательно есть пункты, отвечающие за настройку квадратурной модуляции, что подтверждает ее необходимость в этих устройствах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фокин, Г.А. Технологии программно-конфигурируемого радио / Г.А. Фокин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 316 с.
2. Киселев, А.В. Устройства приема и обработки сигналов: учебно-методическое пособие / А.В. Киселев, Р.Ю. Белоручский, С.В. Тырыкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 55 с.
3. Галкин, В.А. Основы программно-конфигурируемого радио / В.А. Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 372 с.
4. Фокин, Г.А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов / Фокин Г.А. // Труды учебных заведений связи. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 78-94.
5. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR / R.W. Stewart, K.W. Barlee, D.S.W. Atkinson, L.H. Crockett. – Glasgow: Strathclyde Academic Media, 2015. – 646 p.
7. Communication System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio [Электронный ресурс]. – <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/rtlsdradio/>
8. Agilent Spectrum Analysis Basics Application Note 150 [Электронный ресурс]. – [https://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/5952-0292EN.pdf](https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/5952-0292EN.pdf)
9. R820T Datasheet [Электронный ресурс]. – <http://www.rafaelmicro.com/>
10. RTL2832U Datasheet [Электронный ресурс]. – <http://www.realtek.com.tw>

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинги "Сигналы и спектры в вещественной и комплексной форме",  
"Модулированные сигналы и спектры"

1.

```
clearall; clc;
```

```
% Инициализация параметров
```

```
fs = 10240;          % частота дискретизации
```

```
T_max = 1;          % время моделирования
```

```
t = (0:1/fs:(T_max-1/fs)); % временная шкала
```

```
f11 = 100;          % частота 1-й гармоники s1
```

```
f12 = 200;          % частота 2-й гармоники s1
```

```
f13 = 300;          % частота 3-й гармоники s1
```

```
f21 = 97;           % частота 1-й гармоники s2
```

```
f22 = 203;          % частота 2-й гармоники s2
```

```
f23 = 302;          % частота 3-й гармоники s2
```

```
A1 = 10;            % амплитуда 1-й гармоники
```

```
A2 = 1;             % амплитуда 2-й гармоники
```

```
A3 = 4;             % амплитуда 3-й гармоники
```

```
% суммарный сигнал s1 и s2
```

```
s1 = A1*cos(2*pi*f11*t) + A2*cos(2*pi*f12*t) + A3*cos(2*pi*f13*t);
```

```
s2 = A1*cos(2*pi*f21*t) + A2*cos(2*pi*f22*t) + A3*cos(2*pi*f23*t);
```

```
% формирование импульса для корректности отображения фазового спектра
```

```
r = zeros(1,length(t));
```

```
r(1) = 0.01; y1 = s1 + r; y2 = s2 + r;
```

```
% оценкаБПФ
```

```
Nfft = 1024;        % размерностьБПФ
```

```
X1 = (1/Nfft)*fft(y1,Nfft); % вычислениеБПФ s1
```

```
X2 = (1/Nfft)*fft(y2,Nfft); % вычислениеБПФ s2
```

```

f = (0:Nfft-1)/Nfft*fs; % частотная шкала
% построение графика осциллограммы и спектра сигнала s1
figure(1);
subplot(2,3,1); plot(t,y1,'b-', 'LineWidth',2); grid on; xlim([0 0.03]);
title('осциллограмма s_{1}(t)'); xlabel('время (с)'); ylabel('амплитуда');
subplot(2,3,2); stem(f,abs(X1),'r', 'LineWidth',2); grid on; xlim([0 400]);
title('спектр S_{1}(f)'); xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');
subplot(2,3,3); stem(f,rem(angle(X1),pi),'k', 'LineWidth',2);
grid on; axis([0 400 0 pi]); title('спектрфаз S_{1}(f)');
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('фаза (рад)');
% построение графика осциллограммы и спектра сигнала s2
subplot(2,3,4); plot(t,y2,'g', 'LineWidth',2); grid on; xlim([0 0.03]);
title('осциллограмма s_{2}(t)'); xlabel('время (с)'); ylabel('амплитуда');
subplot(2,3,5); stem(f,abs(X2),'c', 'LineWidth',2); grid on; xlim([0 400]);
title('спектр S_{2}(f)'); xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');
subplot(2,3,6); stem(f,rem(angle(X2),pi),'k', 'LineWidth',2);
grid on; axis([0 400 0 pi]); title('спектрфаз S_{2}(f)');
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('фаза (рад)');

```

2.

```

clearall; clc;
% Инициализация параметров
fs = 10240; % частота дискретизации
T_max = 1; % время моделирования
t = (0:1/fs:(T_max-1/fs)); % временная шкала
f1 = 100; % частота 1-й гармоники s1
f2 = 200; % частота 2-й гармоники s1
f3 = 300; % частота 3-й гармоники s1

```

```

A1 = 10;           % амплитуда 1-й гармоники
A2 = 1;           % амплитуда 2-й гармоники
A3 = 4;           % амплитуда 3-й гармоники
% суммарный сигнал s1
s1 = A1*cos(2*pi*f1*t) + A2*cos(2*pi*f2*t) + A3*cos(2*pi*f3*t);
% формирование импульса для корректности отображения фазового спектра
r = zeros(1,length(s1));
r(1) = 0.01; y1 = s1 + r;
% оценка двустороннего БПФ с прямоугольным окном
Nfft = 1024;      % размерность БПФ
X1 = (1/Nfft) * fftshift(fft(y1,Nfft)); % вычисление БПФ
f = ((-Nfft/2):(Nfft/2)-1)/Nfft*fs; % частотная шкала
% построение графика осциллограммы
figure(1);
subplot(3,2,[1 2]); plot(t,y1,'b-','LineWidth',2); grid on;
title('осциллограмма s_{1}(t)'); xlim([0 0.03]);
xlabel('время (с)'); ylabel('амплитуда');
% построение графика двустороннего спектра
subplot(3,2,3); stem(f,abs(X1),'r','LineWidth',2); grid on;
title('двусторонний спектр S_{3}(f)'); axis([-400 400 0 6]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');
% построение графика фазового спектра
g = rem(angle(X1),pi);
subplot(3,2,4); stem(f,g,'k','LineWidth',2); grid on;
title('фазовый спектр S_{3}(f)'); axis([0 400 0 pi]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('фаза (рад)');
% построение вещественной и мнимой частей спектра
i = find(abs(X1) > 0.01); % индексы существенных компонент

```

```

subplot(3,2,5); stem(f(i),real(X1(i)),'g','LineWidth',3); grid on;
title('вещественная часть спектра S_{3}(f)'); axis([-400 400 -6 6]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');
subplot(3,2,6); stem(f(i),imag(X1(i)),'c','LineWidth',3); grid on;
title('мнимая часть спектра S_{3}(f)'); axis([-400 400 -6 6]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');

```

3.

```
clearall; clc;
```

```
% Инициализация параметров
```

```
fs = 10240;          % частота дискретизации
```

```
T_max = 1;          % время моделирования
```

```
t = (0:1/fs:(T_max-1/fs)); % временная шкала
```

```
f1 = 100;           % частота 1-й гармоники
```

```
f2 = 200;           % частота 2-й гармоники
```

```
f3 = 300;           % частота 3-й гармоники
```

```
A1 = 10;            % амплитуда 1-й гармоники
```

```
A2 = 1;             % амплитуда 2-й гармоники
```

```
A3 = 4;             % амплитуда 3-й гармоники
```

```
% суммарный сигнал
```

```
s3 = A1*cos(2*pi*f1*t+pi/4) + A2*cos(2*pi*f2*t+pi/6) + A3*cos(2*pi*f3*t);
```

```
% формирование импульса для корректности отображения фазового спектра
```

```
r = zeros(1,length(s3)); r(1) = 0.01; y3 = s3 + r;
```

```
% оценка БПФ с прямоугольным окном
```

```
Nfft = 1024;        % размерность БПФ
```

```
X3 = (1/Nfft) * fftshift(fft(y3,Nfft)); % вычисление БПФ
```

```
f = ((-Nfft/2):(Nfft/2)-1)/Nfft*fs; % частотная шкала
```

```
% построение графика осциллограммы
```

```

figure(1);
subplot(3,2,[1 2]); plot(t,s3,'b-', 'LineWidth',2); grid on;
title('осциллограмма s_{3}(t)'); xlim([0 0.03]);
xlabel('время (с)'); ylabel('амплитуда');
% построение графика двустороннего спектра
subplot(3,2,3); stem(f,abs(X3),'r', 'LineWidth',2); grid on;
title('двусторонний спектр S_{3}(f)'); axis([-400 400 0 6]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');
% построение графика фазового спектра
subplot(3,2,4); stem(f,rem(angle(X3),pi),'k', 'LineWidth',2); grid on;
title('фазовый спектр S_{3}(f)'); axis([0 400 0 pi]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('фаза (рад)');
% построение вещественной и мнимой частей спектра
i = find(abs(X3) > 0.01); % индексы существенных компонент
subplot(3,2,5); stem(f(i),real(X3(i)),'g', 'LineWidth',3); grid on;
title('вещественная часть спектра S_{3}(f)'); axis([-400 400 -6 6]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');
subplot(3,2,6); stem(f(i),imag(X3(i)),'c', 'LineWidth',3); grid on;
title('мнимая часть спектра S_{3}(f)'); axis([-400 400 -6 6]);
xlabel('частота (Гц)'); ylabel('амплитуда');

```

