

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

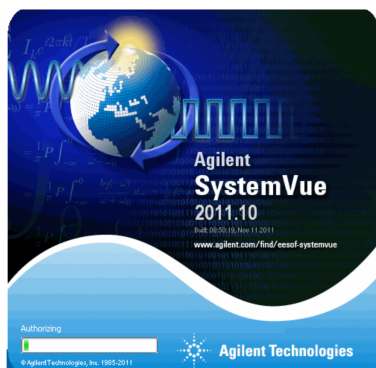
**«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»**

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

СИСТЕМЫ LTE

Лабораторный практикум

Методическое пособие к лабораторным занятиям



Разработчики:
Доцент каф. ТОР
Демидов А.Я.
Инженер каф. ТОР
Крюков Я.В.
Доцент каф. ТОР
Попова К.Ю.

Томск 2015

Оглавление

Лабораторная работа №1 “Метод множественного доступа OFDMA”	2
Лабораторная работа №2 “Метод множественного доступа SC-FDMA”	16
Лабораторная работа №3 “Процедура эквалайзирования в OFDM”	22
Лабораторная работа №4 “Временная синхронизация в OFDM”	37
Лабораторная работа №5 “Частотная синхронизация в OFDM”	54

Лабораторная работа №1 “Метод множественного доступа OFDMA”

Цель работы

Ознакомиться с методом множественного доступа OFDMA, организовать канал передачи OFDMA-символов в системе SystemVue, построить зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум на входе демодулятора для каждого канала.

Введение

Множественный доступ с ортогональным частотным разделением (OFDMA) представляет собой улучшенную технологию OFDM, также являясь основой для систем мобильного широкополосного доступа следующих поколений. Так же эту технологию можно назвать многопользовательской версией OFDM. Различие состоит в том, что OFDMA приписывает наборы поднесущих отдельным пользователям, тем самым позволяя одновременную низкоскоростную передачу данных для нескольких абонентов. С точки зрения формирования модуляционных символов OFDMA аналогичен OFDM: OFDMA-символ включает собственно зону передачи данных и предшествующий ему защитный интервал (повтор начального фрагмента символа), предназначенный для предотвращения межсимвольной интерференции). Сам символ – это совокупность модулированных ортогональных поднесущих. Метод OFDMA позволяет получить большую гибкость при управлении различными пользовательскими устройствами с разными типами антенн. Он уменьшает взаимные помехи для устройств со всенаправленными антеннами и улучшает прием в условиях непрямой видимости, что весьма существенно для мобильных пользователей.

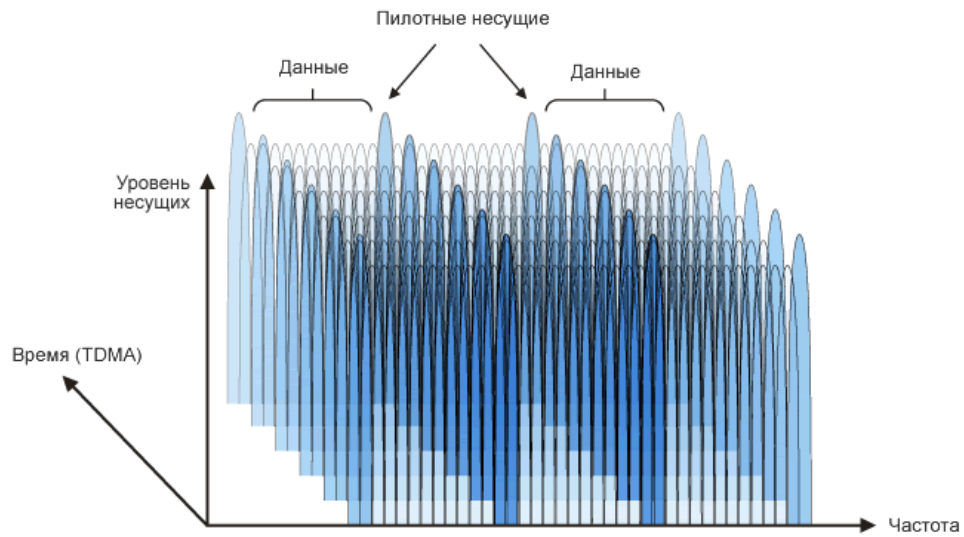


Рисунок 7.1 – Доступ к частотно-временному ресурсу в OFDMA

Подканалы могут быть распределены между разными абонентами в зависимости от условий передачи и требуемой пропускной способности. Этим достигается более эффективное использование ресурсов. При этом расположение каналов в спектре может происходить по любому закону, в том числе по псевдслучайному (рис. 2).

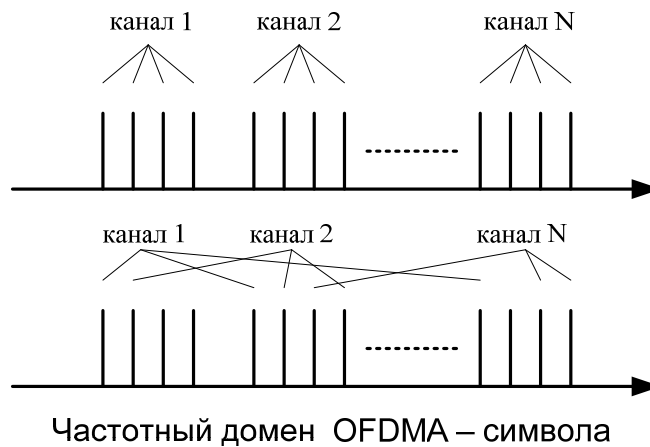


Рисунок 7.2 - Пример расположения каналов в частотном домене OFDM-символа

Ход лабораторной работы

Приведенная методология работы по созданию модели OFDMA в системе SystemVue предполагает выполнение предыдущей работы по OFDM.

1. Создание проекта и настройка симуляции

Создайте новый проект используя с помощью создания нового рабочего пространства Blank. Сохраните проект под названием OFDMA. Переименуйте файлы проекта:



Рисунок 7.3 – Файлы проекта

В файле OFDMA настройте параметры симуляции. Задайте значение частоты дискретизации (System Sample Rate) - 30.72 МГц. Количество отсчетов симуляции (Number of Samples) – 100000. Убедитесь, что в качестве схемы выбрана OFDMA_Scheme, а в качестве файла с результатами симуляции – OFDMA_Dataset.

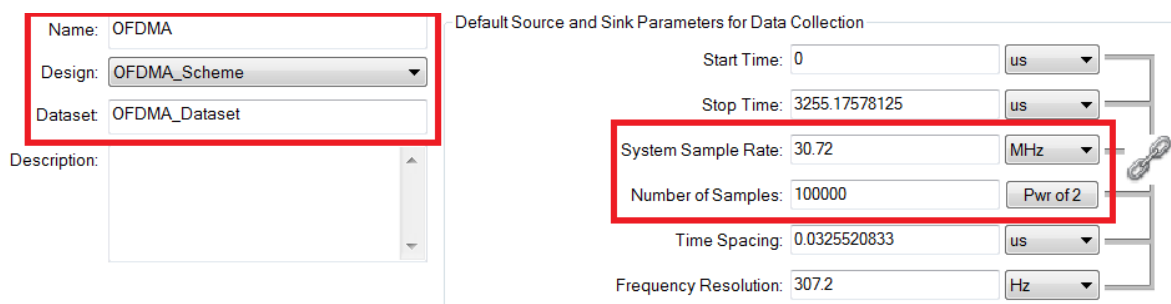


Рисунок 7.4 – Настройка файла симуляции

2. Создание подсистемы формирования канала данных

Создайте подсистему формирования OFDMA канала. В качестве передаваемого в канале сообщения используется случайная последовательность бит. Назовите подсистему Data_Channel. Схема внутри подсистемы выглядит следующим образом:



Рисунок 7.5 – Настройка файла симуляции

С выхода **Bits** - немодулированные биты, которые будут использоваться в качестве опорных для оценки вероятности битовой ошибки. С выхода **OFDMA_Symbols** – модулированные и расставленные в частотном домене символы квадратурной модуляции. В качестве используемых параметров подсистемы – параметры модуляции бит и размещения в частотном домене: размерность FFT, количество используемых каналом поднесущих и их адресация. Создайте 4 новых параметра, как показано на рисунке 7.6, обязательно укажите значения в столбце Default (по-умолчанию):

Name	Description	Default Value	Units	Tune	Show	Initially Use Default	Validation	Hide Condition
FFT_Size		128	()	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Floating point n	
Ch_Num_S		1	()	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Floating point n	
Ch_Ind_Sc		1	()	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Floating point n	
ModType		1	()	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Floating point n	

Below the table are buttons for "Add Parameter", "Copy Parameters", and "Delete Selected Parameter". At the bottom, there are navigation buttons: "PartList", "Schematic", "Equations", and "Parameters".

Рисунок 7.6 – Настройка подсистемы

Задействуем в модели 5 видов квадратурной модуляции (могут быть выбраны любые доступные в блоке Mapper типы модуляции): BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64 и APSK-16. В поле уравнений (Equations) запишите условия выбора модуляции в блоке Mapper зависимости от параметра ModType:

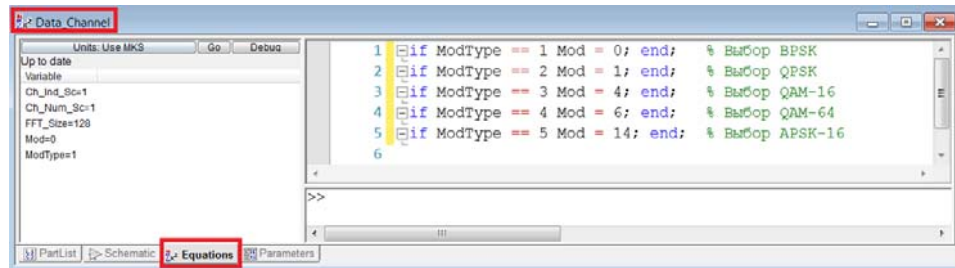


Рисунок 7.6 – Условие выбора модуляции

Задайте значение созданных параметров в блоках на схеме, как показано на рисунке 7.7.

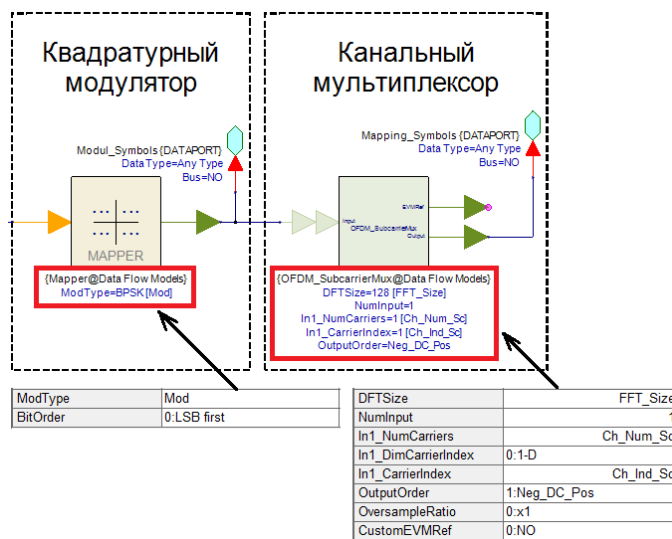


Рисунок 7.7 – Настройка блоков модулятора и мультиплексора

3. Формирование OFDMA-символа

Формируемый OFDMA-символ будет включать в себя 3 канала. Каждый канал имеет свой тип модуляции, количество и адресацию используемых поднесущих. Размер циклического префикса OFDMA-символа – 16 отсчетов.

Величины параметров, которые используются сразу в нескольких блоках можно описать в поле уравнений (Equations). В качестве постоянных параметров укажите размерность FFT и размерность циклического префикса. Так же внесите параметры каждого из 3-х каналов. Запишите в поле уравнений выражения, приведенные на рисунке 7.8.

```

1
2 FFT_Size = 256; % Размерность FFT в системе
3 CP_Size = 16; % Размер циклического префикса
4
5 % Первый канал
6 Ch1_Num_Sc = 100; % Количество используемых поднесущих
7 Ch1_Ind_Sc = [-50:-1,1:50]; %Адресация поднесущих
8 Ch1_Mod = 2; % Модуляция первого канала (QPSK)
9 % Второй канал
10 Ch2_Num_Sc = 50; % Количество используемых поднесущих
11 Ch2_Ind_Sc = [-100:-51]; %Адресация поднесущих
12 Ch2_Mod = 3; % Модуляция канала (QAM-16)
13 % Третий канал
14 Ch3_Num_Sc = 50; % Количество используемых поднесущих
15 Ch3_Ind_Sc = [51:100]; %Адресация поднесущих
16 Ch3_Mod = 4; % Модуляция канала (QAM-16)

```

Рисунок 7.8 – Выражения для записи параметров канала

Разместите параллельно на схеме *OFDMA_Scheme* 3-и канала данных, указав соответствующие параметры для каждого канала. Соедините выход **OFDMA_Symbols** каждого канала со входом сумматора, таким образом вы складываете в частотном домене спектральные отсчеты каждого канала. Запишите результаты симуляции 256-ти отсчетов с помощью блока *Sink* и постройте график.

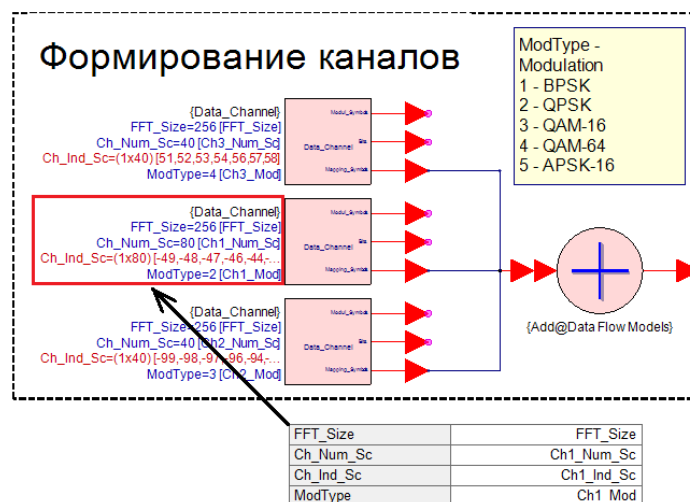


Рисунок 7.9 – Настройка каналов

Частотный домен OFDMA-символа является результатом канального мультиплексирования, в следствии которого каждый канал располагается в предназначенном ему участке спектра (рис. 7.10).

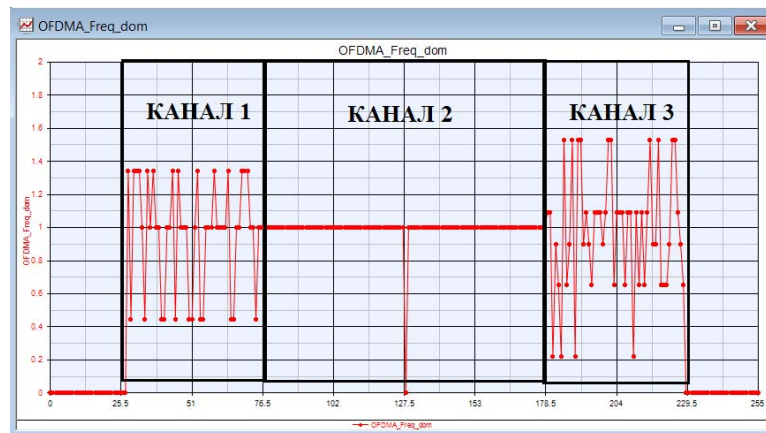


Рисунок 7.10 – Спектр OFDMA символа

Оставшиеся операции по формированию OFDMA-символа подобны операциям формирования OFDM-символа из предыдущей лабораторной работы. Добавьте на схему блок ОБПФ (FFT_Сх) и блок добавления циклического префикса (OFDM_GuardInsert). В качестве параметров блоков используйте созданные в поле уравнений переменные (FFT_Size и CP_Size), а также **обратите внимание** на параметры направления и типа преобразования Фурье. Полная схема формирования OFDMA-символа представлена на рисунке 7.10.

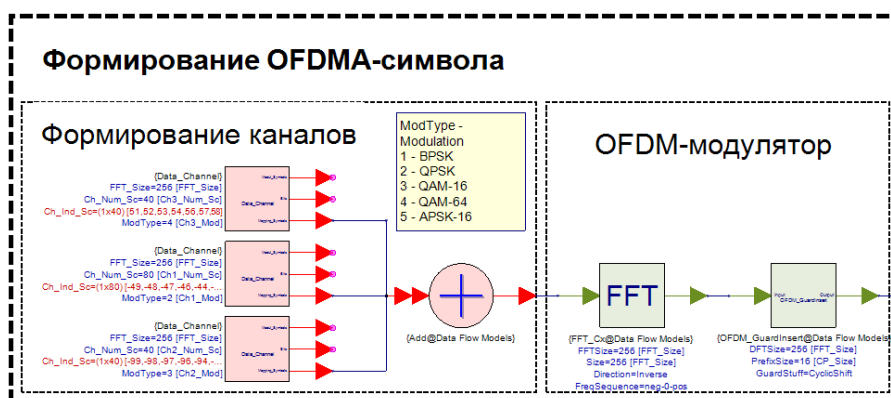


Рисунок 7.10 – Схема формирования OFDMA-сигнала

Постройте спектр OFDMA-символа после операции добавления циклического префикса (рис. 7.11).

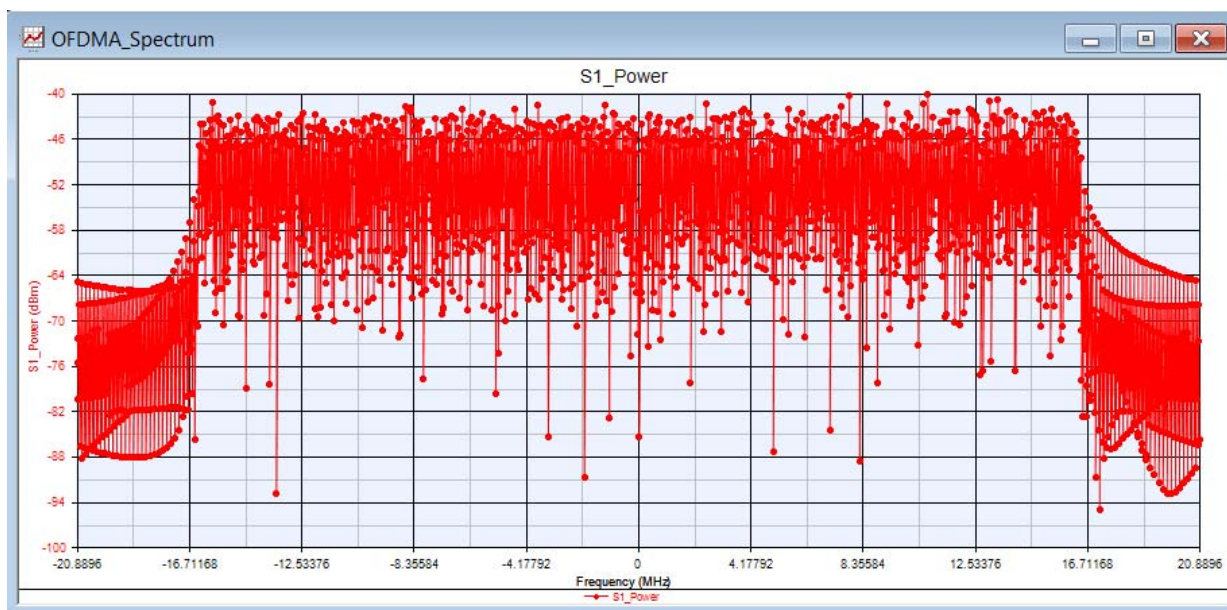


Рисунок 7.11 – Спектр OFDMA сигнала

4. Обработка OFMDA-символа

Соберите схему OFDMA-демодулятора, которая является обратной схеме OFDMA-модулятора. После операции БПФ в приемнике каждый канал селектируется и обрабатывается. Чтобы обработать канал нужно выделить в частотном домене OFDMA-символа только те спектральные отсчеты, которые соответствуют этому каналу (канальный селектор). Для этого создайте новую подсистему `Data_Channel_Demod`, которая будет отвечать за процедуру селекции канала и демодуляцию. Параметры и уравнения для этой подсистемы создайте полностью идентичными подсистеме `Data_Channel`. Схема изображена на рисунке 7.12.

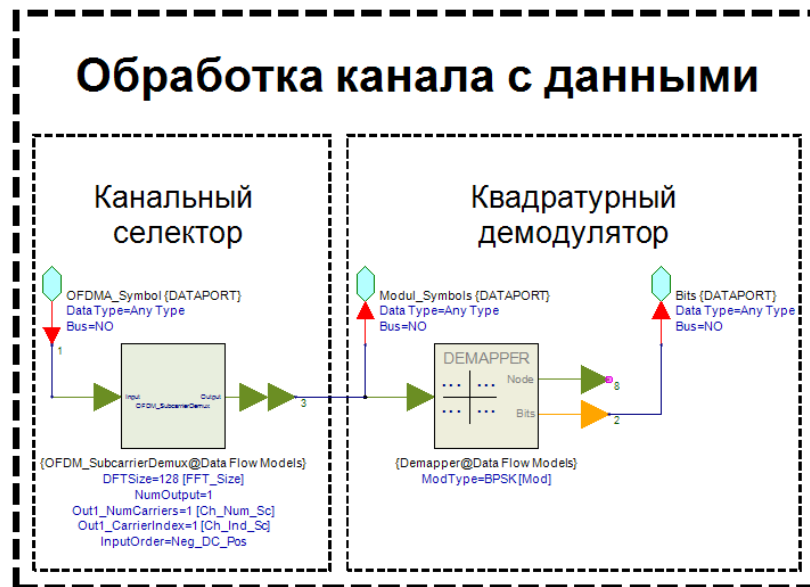


Рисунок 7.12 – Схема обработки пользовательского канала с данными

Разместите на схеме параллельно 3 канальных демодулятора. Параметры для каждого демодулятора установите исходя из параметров формирования каждого канала. Вход каждого из них соедините с выходом блока БПФ (FFT_Cx) как показано на рисунке 7.13.

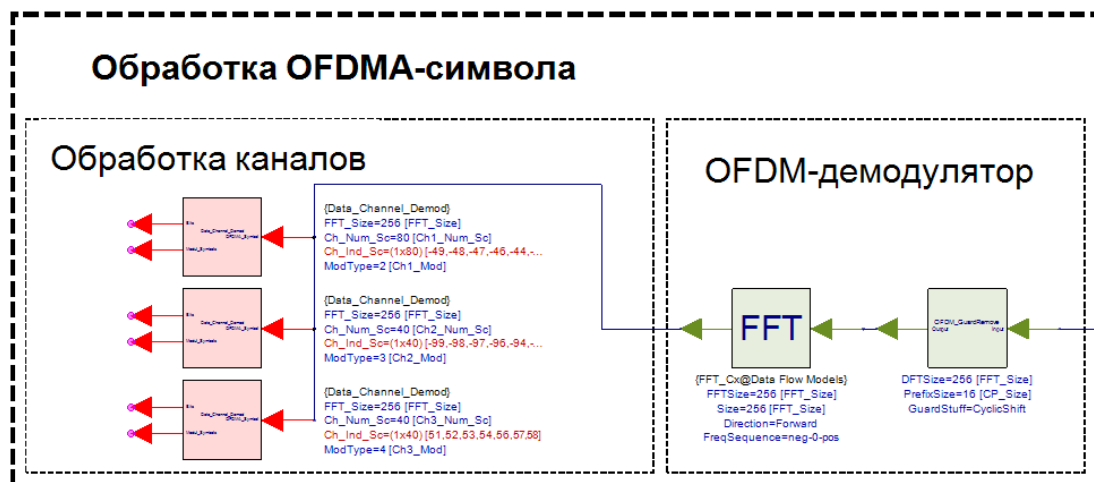


Рисунок 7.13 – Схема обработки OFDMA-сигнала

Для проверки работоспособности модели OFDMA-системы требуется расчет вероятности битовой ошибки. Для этого разместите на схему 3 блока BER_FER. В параметрах блока укажите работу с отсчетами (Samples). Подайте

на вход TEST блоков *BER_FER* выходы соответствующих канальных демодуляторов, а на вход REF – выход **Bits** блока формирования канала как показано на рисунке 7.14.

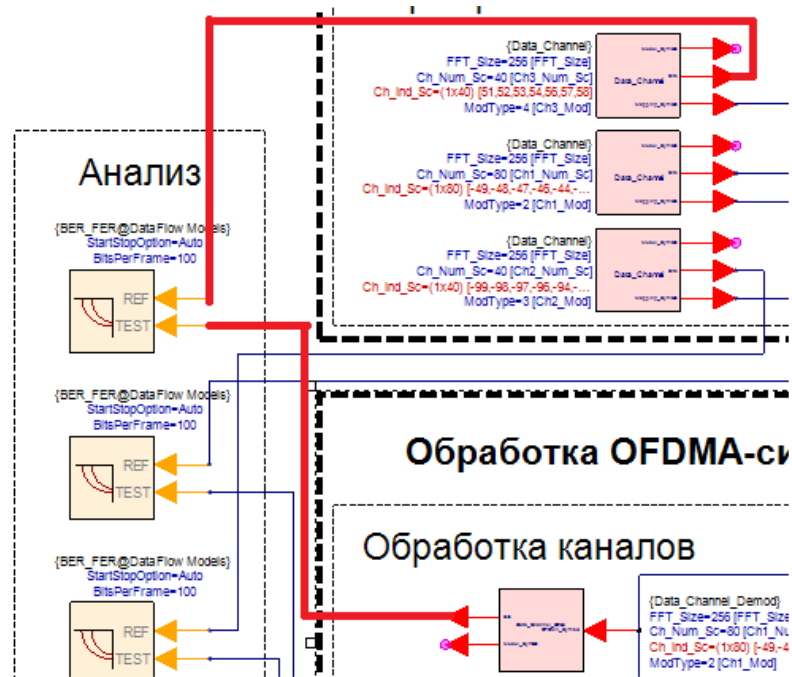


Рисунок 7.14 – Расчет BER

5. Добавление модели канала РВВ с АБГШ

В прошлой работе, посвященной OFDM, была создана подсистема, отвечающая за генерирование и наложение сигнала белого гауссова шума (АБГШ) на сигнал. В данной лабораторной работе вы будете использовать уже созданную подсистему. Чтобы добавить подсистему на схему, необходимо зайти в Library Selector:

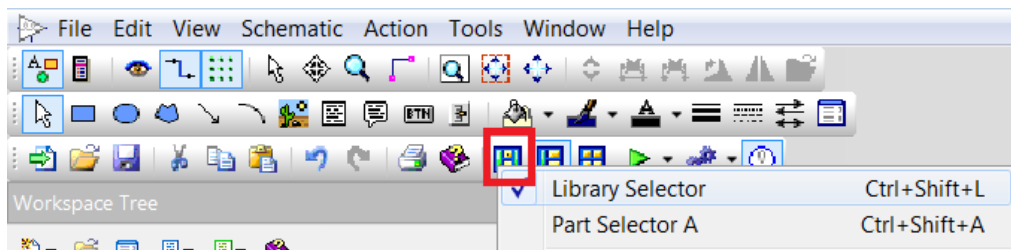


Рисунок 7.15 – Расположение Library Selector

Далее требуется выбрать тип библиотеки и созданную вами ранее библиотеку, в которой хранится сохраненная ранее подсистема Channel_AWGN (рис. 7.16). Добавьте подсистему в каталог проекта двойным нажатием и разместите на схеме между OFDMA-передатчиком и приемником (схема полной модели приведена в приложении):

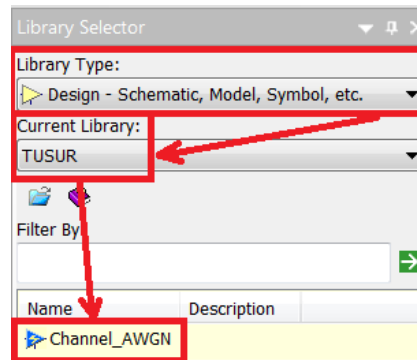


Рисунок 7.16 – Добавление подсистемы *Channel_AWGN*

6. Анализ данных

6.1 Расчет отношения сигнал/шум на входе демодулятора

Для расчета отношения сигнал/шум (ОСШ) требуется сравнить среднюю мощность сформированного OFDMA-символа в передатчике и принятого OFDMA-символа в приемнике. Алгоритм расчета возьмите из предыдущей работы. Создайте новый файл уравнения (Equation – назв. SNR). Запишите в уравнение выражения, приведенные на рисунке 7.17.

```

1  using('OFDMA_Dataset');    % Обращение к данным в файле
2  L = length(Tx_OFDMA_Freq); % Длина сигнала
3
4  Power_Tx = sum(abs(Tx_OFDMA_Freq).^2)/L; % Средняя мощность переданных символов
5  Power_Rx = sum(abs(Rx_OFDMA_Freq).^2)/L; % Средняя мощность принятых символов
6
7  SNR = 10*log10(Power_Tx/(Power_Rx-Power_Tx)); % Расчет ОСШ
8  SNR = round(SNR); % Округление ОСШ
9
10 setvariable('OFDMA_Dataset','SNR',SNR); % Запись переменной SNR в файл OFDMA_Dataset

```

Рисунок 7.17 – Выражения для расчета отношения сигнал/шум

Tx_OFDMA_Freq – отсчеты с выхода сумматора в OFDMA-формирователе, а Rx_OFDMA_Freq – отсчеты после блока БПФ в OFDMA-приемнике. Для вывода результатов расчета ОСШ на экран воспользуйтесь инструментом Text (рис. 7.18) в окне инструментов (Напоминание: 1-е текстовое окно ОСШ =; 2-е текстовое окно = SNR):

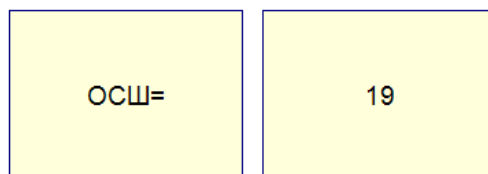


Рисунок 7.18 – Вывод результатов расчета ОСШ

6.2 Анализ данных. Циклическая симуляция. Зависимость битовых ошибок для каждого канала от ОСШ на входе демодулятора

Создание циклической симуляции и анализ данных были рассмотрены в прошлой работе. Создайте новую циклическую симуляцию (Sweep) с параметрами, приведенными на рисунке 7.19.

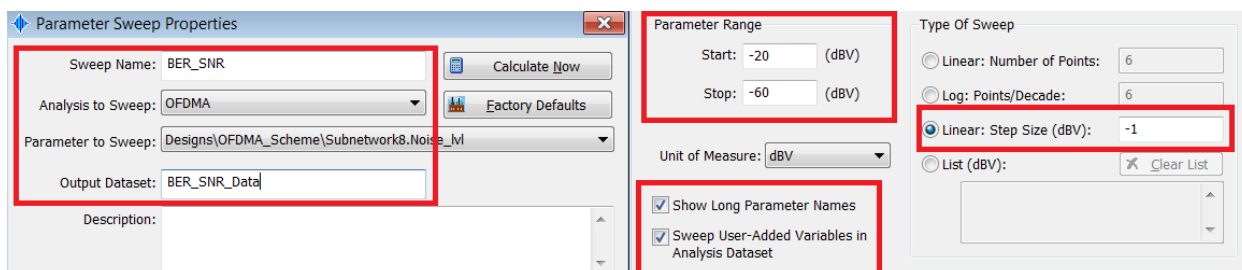


Рисунок 7.19 – Настройка sweep - симуляции

Проведите измерения вероятности битовой ошибки для всех каналов и постройте графики зависимости битовой ошибки от ОСШ для всех каналов в одном окне. Настройка графика для первого канала представлена на рисунке 7.20.

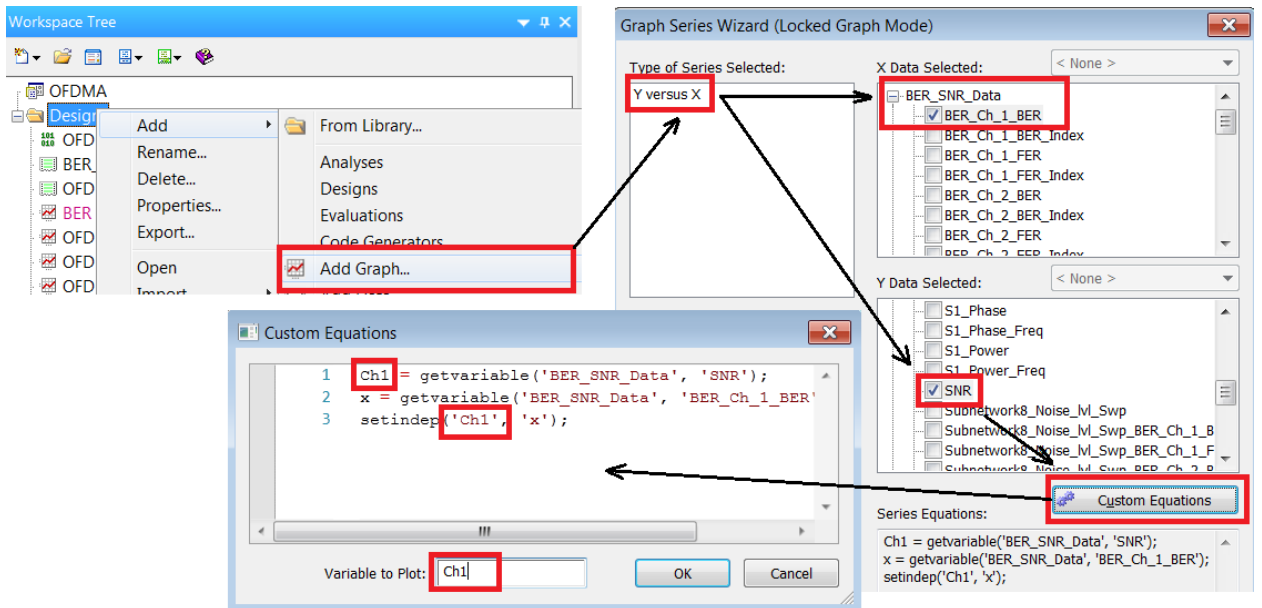


Рисунок 7.20 – Настройка графического окна для первого канала

Поместите на этот график остальные каналы, подпишите оси (ось X – ОСШ, ось Y – BER), выставите логарифмический масштаб по оси Y. После всех операций настройки графика должны выглядеть так, как показано на рисунке 7.21.

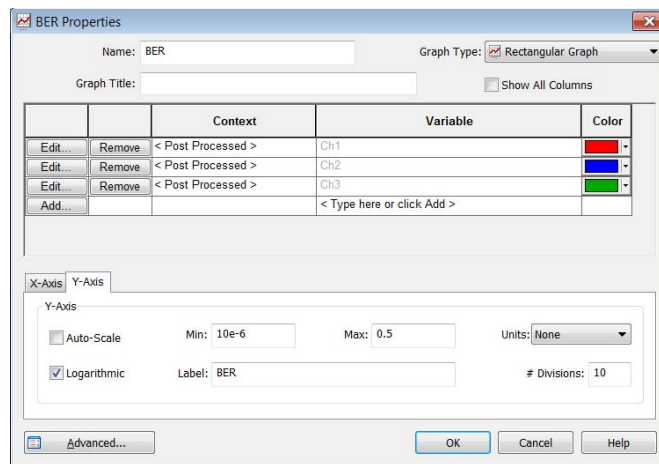


Рисунок 7.21 – Настройка графического окна для первого канала

График зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для трех каналов представлен на рисунке 7.22.

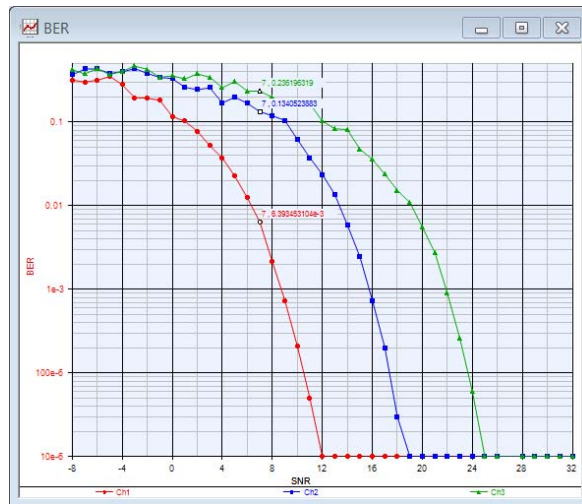
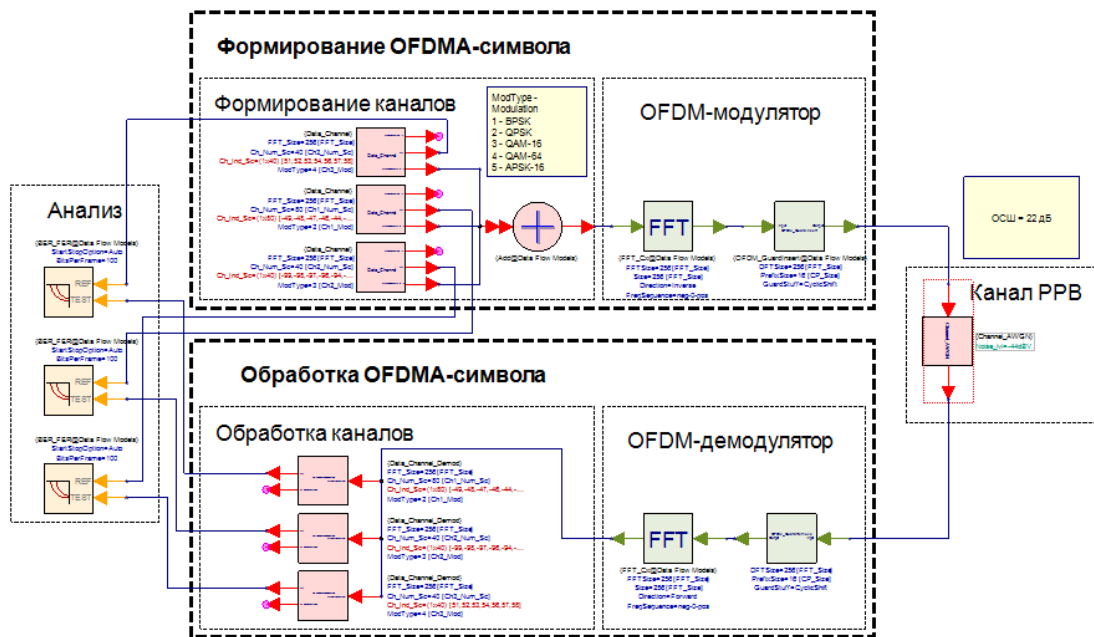


Рисунок 7.22 – Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для трех каналов

Приложение “Опорная полная схема модели”



Лабораторная работа №2 “Метод множественного доступа SC-FDMA”

Цель работы

Целью работы является изучение технологии множественного доступа SC-FDMA и сравнении ее с технологией OFDMA. Реализовать модель формирования OFDMA и SC-FDMA сигнала, рассчитать и сравнить ПИК-факторы обоих сигналов.

Введение

Метод множественного доступа SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access) в настоящее время используется при организации восходящего канала связи (от мобильной станции к базовой станции) в системе беспроводной связи широкополосного доступа LTE. Технология SC-FDMA является альтернативой OFDMA и применяется, в первую очередь, для снижения ПИК-фактора сигнала, который является одним из недостатков технологии OFDMA. Высокий ПИК-фактор накалывает дополнительные требования к динамическому диапазону усилителей сигнала и повышает их стоимость. Для оборудования базовой станции повышение цены усилителей сигнала не критично, т.к. такое оборудование по себе имеет большую стоимость и должно отвечать максимальным стандартам качества и надежности. Однако для оборудования мобильной станции (пользовательское оборудование: мобильные телефоны, модемы, гаджеты и т.д.) повышение стоимости одного из элементов может стать критичным, т.к. будет существенно влиять на стоимость изделия для обычных пользователей. Поэтому, при формировании сигнала на стороне пользователя используется

SC-FDMA для уменьшения ПИК-фактора и уменьшения требований к усилителям.

Процедура формирования SC-FDMA сигнала осуществляется по алгоритму формирования OFDMA сигнала с одним исключением – перед размещением канальных символов по поднесущим (канальным мультиплексированием) над массивом канальных символов применяется дополнительное прямое преобразование Фурье (рис. 1).

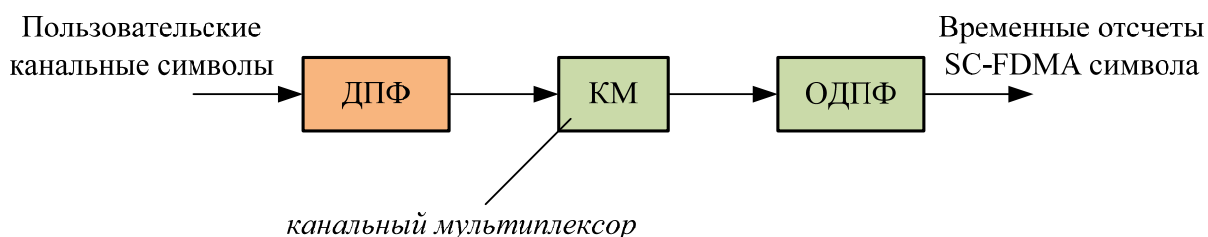


Рисунок 1 – Схема формирования временных отсчетов SC-FDMA символа

На рисунке 1 оранжевым цветом обозначен блок, выполняющий ДПФ, который является единственным отличием от классической схемы формирования OFDMA сигнала. Дополнительная операция ДПФ приводит QAM-сигнал к шумоподобному сигналу, который после ОДПФ обладает меньшим ПИК-фактором в отличие от QAM-сигнала, который сразу поступает на вход блока ОДПФ в OFDMA схеме. Однако, дополнительная операция БПФ нагружает сигналный процессор и требует дополнительных вычислительных ресурсов.

Ход лабораторной работы

Методика выполнения данной лабораторной работы опирается на предыдущие лабораторные работы: OFDM-модуляция и Метод множественного доступа с частотным разделением каналов OFDMA, которые рекомендуется выполнить.

1. Создание проекта и настройка симуляции

Создайте новый проект с помощью нового рабочего пространства *Blank*. Сохраните проект под названием *SC_FDMA*. Переименуйте файлы проекта так, как показано на рисунке 2. Убедитесь, что в файле *SC_FDMA_Analysis* в качестве исполняемой схемы выбрана *SC_FDMA_Schematic*, а количество отсчетов моделирования (*Number of Samples*) укажите равным 5000. Так же укажите в поле *Dataset* (под выбором исполняемой схемы) название файла с данными – *SCFDMA_Data*. Все остальные настройки симуляции оставьте по умолчанию.

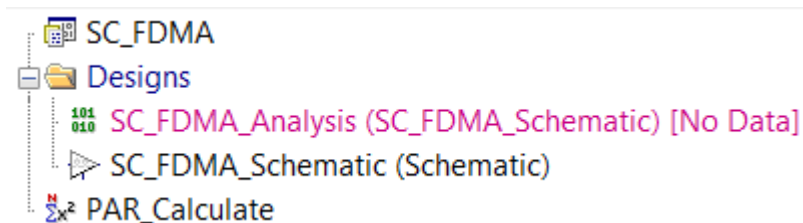


Рисунок 2 – Файлы проекта

2. Создание модели формирования OFDMA и SC-FDMA сигнала

Опираясь на лабораторную работу “OFDM-модуляция” создайте модель формирования OFDMA-сигнала без добавления циклического префикса (если мультиплексирование пользовательских каналов отсутствует, т.е. в спектре OFDMA размещается один абонентский канал, то можно считать, что схемы формирования OFDMA и OFDM одинаковы).

Размерность БПФ ($FFTSize$) выберете из таблицы 1 в соответствии с вариантом. В канальном мультиплексоре (блок $OFDM_SubcarrierMux$) укажите параметры так, как показано на рисунке 3 ($Nfft$ и Nsc из таблицы 1).

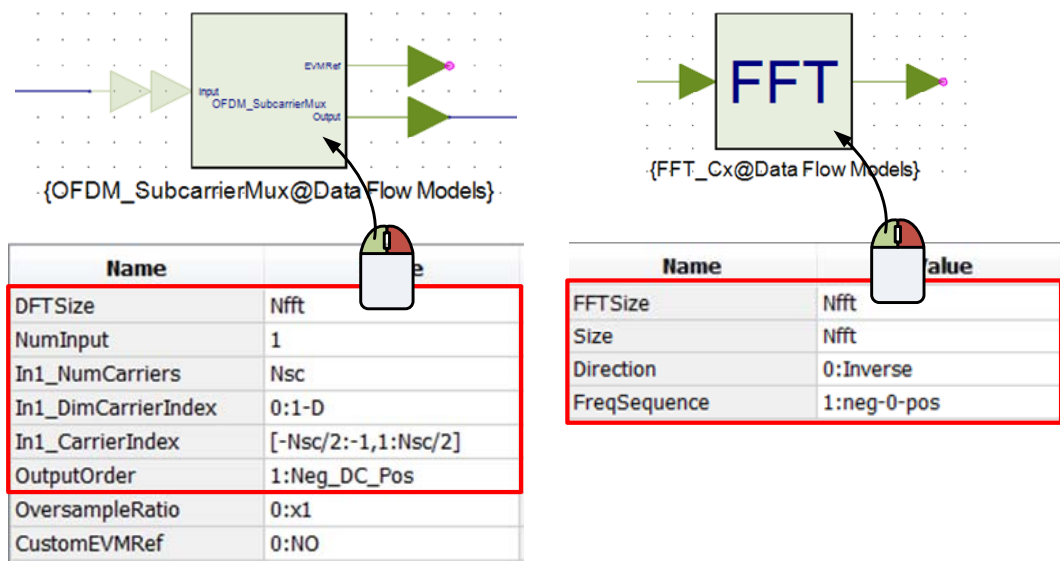


Рисунок 3 – Настройка блоков $OFDM_SubcarrierMux$ и FFT_Cx

Согласно схеме, представленной на рисунке 1, реализуйте модель формирования SC-FDMA, в которой используются те же самые канальные символы, что при OFDMA. Размерность БПФ в предварительном блоке прямого преобразования Фурье равна N_{SC} .

Таблица 1 – Размерность N_{FFT} по вариантам

Вариант	1	2	3	4
N_{FFT}	256	512	1024	2048
N_{SC}	150	300	600	1200

Добавьте на схему блок сбора данных $Sink$ (или два блока) и подайте на вход спектральные отсчеты с выхода канального мультиплексора. В параметрах блока $Sink$ укажите сбор данных по отсчетам и максимальное количество отсчетов (Samples from 0 to ...) равное $N_{FFT}-1$. В различных графических окнах постройте графики спектральных отсчетов OFDMA и SC-

FDMA символов после канального мультиплексора и назовите их соответственно *OFDMA_Spectrum* и *SCFDMA_Spectrum*.

3. Расчет ПИК-фактора

Добавьте на схему еще два блока сбора данных для записи сформированных отсчетов OFDMA и SC-FDMA сигнала (настройте их по методу, который описан в предыдущем абзаце) и назовите их *OFDMA_Signal* и *SCFDMA_Signal* соответственно. Откройте файл *PAR_Calculate* и напишите программный код, представленный на рисунке 4.

```
1 using('SCFDMA_Data'); % Загрузка переменных из файла
2
3 % Расчет ПИК-фактора в дБ
4 PAR_OFDMA = 10*log10(max(abs(OFDMA_Signal))/sqrt(sum(abs(OFDMA_Signal).^2)/length(OFDMA_Signal)));
5 PAR_SCFDMA = 10*log10(max(abs(SCFDMA_Signal))/sqrt(sum(abs(SCFDMA_Signal).^2)/length(SCFDMA_Signal)));
```

Рисунок 4 – Выражения для расчета ПИК-фактора

Добавьте вывод переменных со значением ПИК-фактора на схему. Для этого разместите рядом друг с другом (рис. 6) два элемента текстового поля, которое находится на дополнительной панели инструментов (рис. 5).

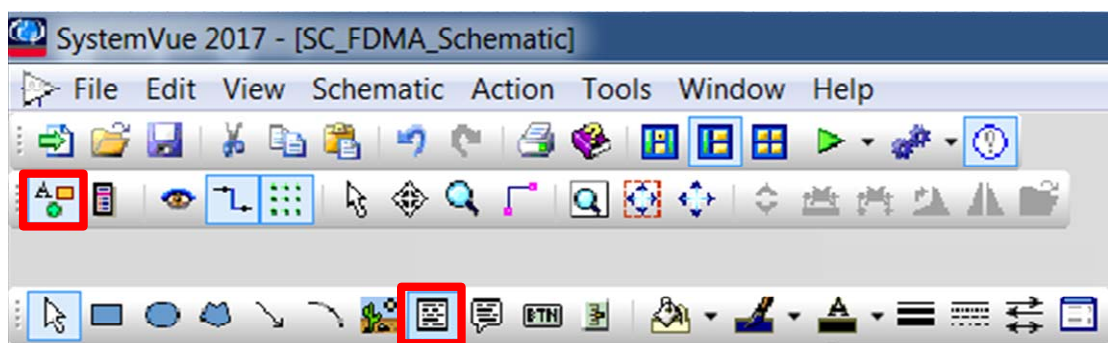


Рисунок 5 – Дополнительная панель инструментов с элементом “текстовое поле”

Разместите текстовое поле где-нибудь возле части схемы, которая отвечает за формирование OFDMA-сигнала. Настройте текстовое поле так,

как показано на рисунке 6. Разместите еще два текстовых поля возле части схемы, отвечающий за формирование SC-FDMA сигнала и настройте их соответственно.

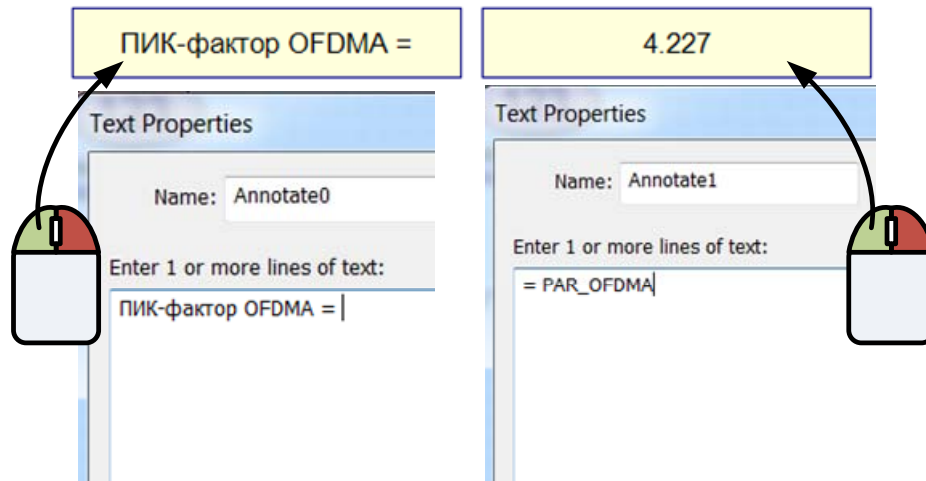


Рисунок 6 – Настройка текстового поля

Произведите 10 расчетов и запишите результаты измерений ПИК-фактора в отдельную таблицу или документ. Рассчитайте среднее значение ПИК-фактора для OFDMA и SC-FDMA сигналов.

4. Контрольные вопросы

1. Для чего используется технология SC-FDMA?
2. Где используется технология SC-FDMA?
3. Плюсы и минусы SC-FDMA?
4. Сравнение спектра SC-FDMA и OFDMA?
5. Схема формирования SC-FDMA сигнала?

Лабораторная работа №3 “Процедура эквалайзирования в OFDM”

Цель работы

Целью работы является изучение влияния канала многолучевого распространения на OFDMA-символ; компенсация искажений, вызванных частотно-селективными замираниями в канале (эквалайзирование).

Введение

В любых радиотехнических системах сигнал в точку приема может поступать несколькими путями с различным временем задержки. Наличие нескольких путей связано со следующими факторами: с рассеянием радиоволн в атмосфере; с отражением от неоднородностей тропосферы; с отражением от препятствий и различных объектов, встречающихся на пути. Временная задержка одного сигнала относительно другого может быть соизмерима как с длительностью информационной посылки, так и с периодом несущего колебания. Кроме того, она в силу множества причин может быть непостоянной.

Если задержка соизмерима с периодом несущего колебания, то ее можно считать эквивалентной фазовому сдвигу, и результатом сложения будет усиление или ослабление принимаемого сигнала. При непостоянстве задержки возникают замирания. Если задержка одного сигнала относительно другого соизмерима с длительностью информационной посылки, то их сложение, наряду с замираниями, приводит к межсимвольной интерференции – нарушению формы модулирующего колебания и искажению информации.

В беспроводных системах связи существует несколько общих моделей воздушного канала передачи (рис. 9.1): а – модель канала Гаусса (прямой луч),

б – модель канала Релея (прямой и отраженные лучи) в – модель канала Райса (отраженные лучи).

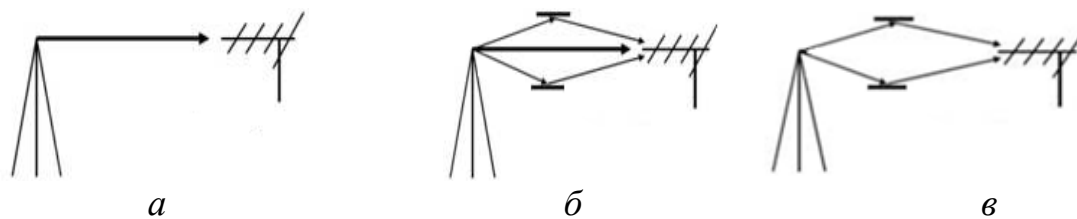


Рисунок 9.1– Модели каналов распространения

В OFDMA-системах для уменьшения амплитудных, частотных и фазовых искажений переданного сигнала применяют эквалайзирование канала. Существует множество различных методов эквалайзирования, однако, общий принцип всех эквалайзеров состоит в том, чтобы оценить передаточную функцию канала и скомпенсировать искажения спектра OFDMA-символа. Для оценки передаточной функции канала используют опорные сигнал (пилоты), которые равномерно размещают в частотном домене OFDMA-символа (рис. 9.2). На приемной стороне заранее известно расположение и вид опорного сигнала, поэтому сравнив принятый и известный опорный сигнал, можно оценить функцию искажения опорного сигнала в канале.

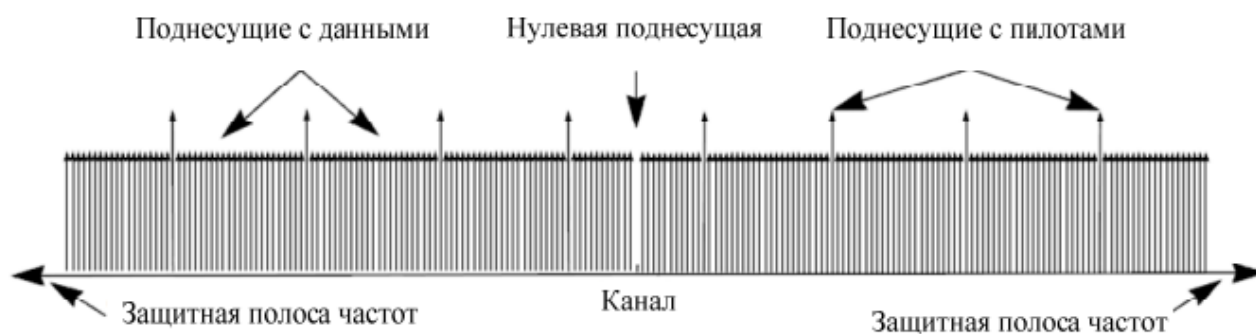
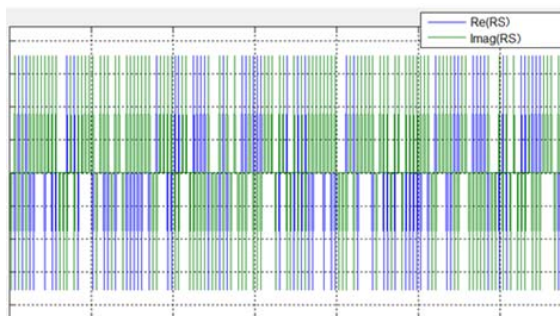


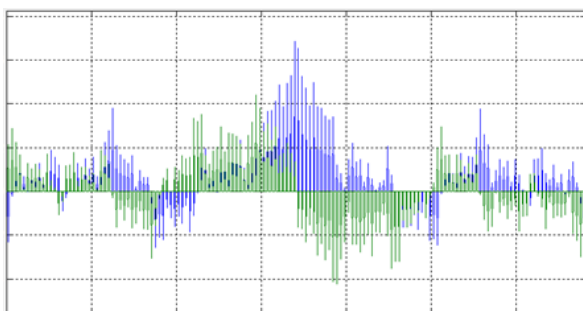
Рисунок 9.2–Расположение опорных поднесущих

Полученная передаточная функция канала интерполируется на весь спектр OFDMA-символа, после чего каждый спектральный отсчет символа

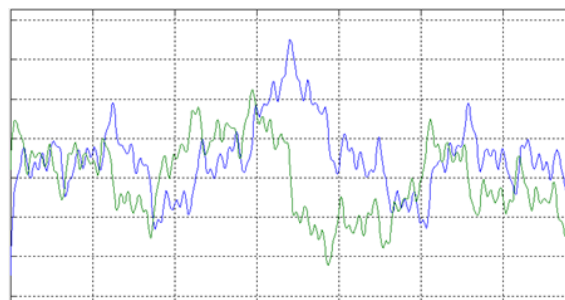
делится на соответствующее значение функции интерполяции. На рисунке 9.3 приведены комплексные спектральные отсчеты.



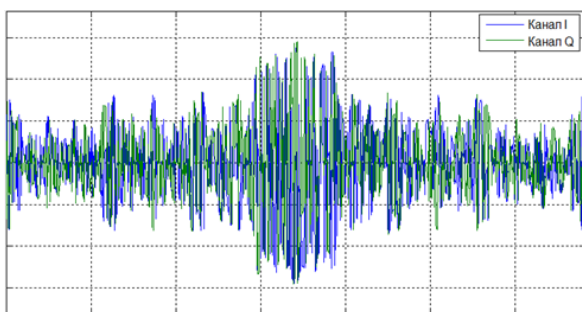
Сформированный в передатчике OFDMA-символ



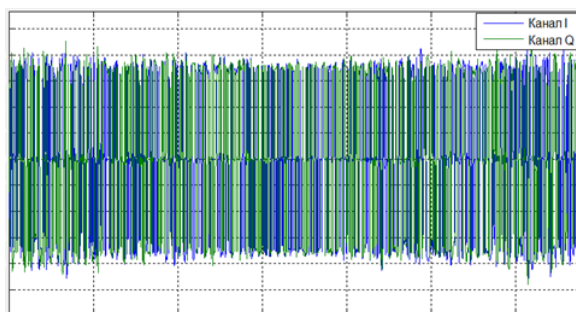
Оценка передаточной функции канала по опорному сигналу



Интерполяция передаточной функции канала на весь спектр OFDMA



OFDMA-символ после канала РРВ до эквалайзера



OFDMA-символ после эквалайзера в приемнике

Рисунок 9.3 – Оценка передаточной функции канала и эквалайзирование

Ход лабораторной работы

Приведенная методология работы по созданию модели эквалайзера OFDMA в системе SystemVue предполагает выполнение предыдущей работы по OFDMA.

1. Создание нового проекта

Откройте проект *OFDMA*, который был завершен в предыдущей работе. Сохраните его под названием *OFDMA_Eq*. Настройки параметров симуляции и названия исполняемых файлов проекта оставьте неизменными. Схема модели уже имеющейся модели представлена на рисунке ниже. На этой схеме отсутствуют порты для сбора данных и блоки анализа данных.

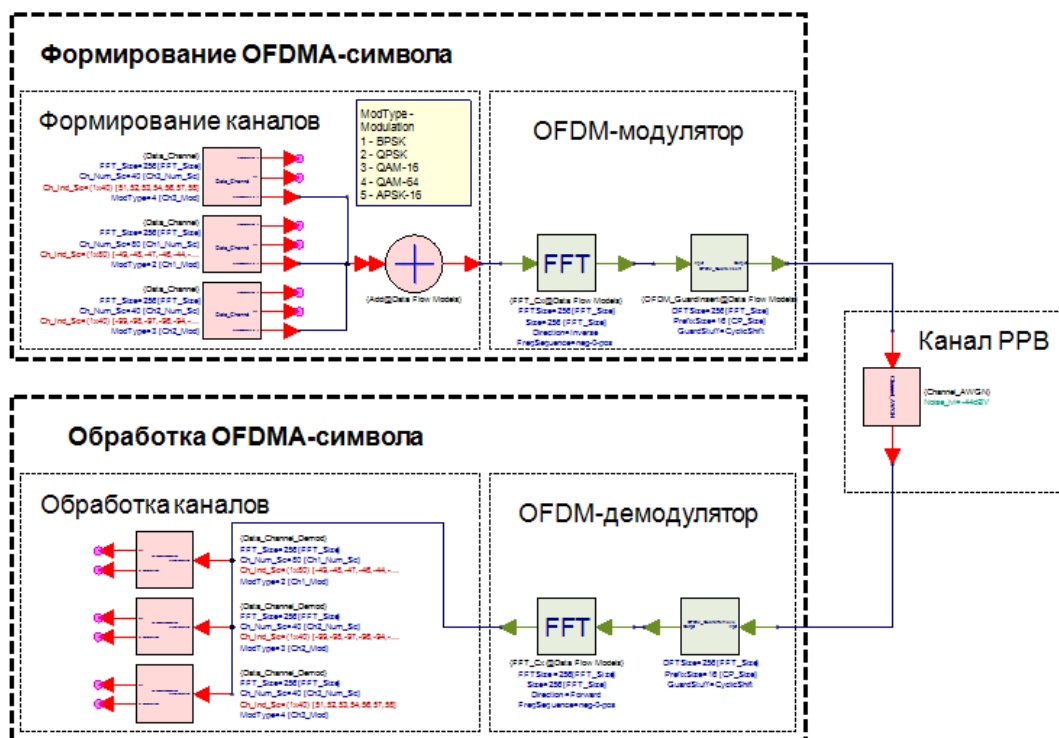


Рисунок 9.4 – Схема модели OFDMA

В настоящей работе предстоит создать и добавить на схему модель канала многолучевого распространения, сформировать канал с опорным сигналом и эквалайзер.

2. Канал многолучевого распространения.

Многолучевой канал распространения можно представить в виде суммы всех лучей на входе приемной антенны. Каждый луч можно охарактеризовать ослаблением и временной задержкой в тракте. Создайте подсистему *Channel_Multipath* многолучевого канала и сохраните ее в библиотеку *TUSUR*. Схема формирования канала, состоящего из 3-х лучей, изображена на рисунке 9.5.

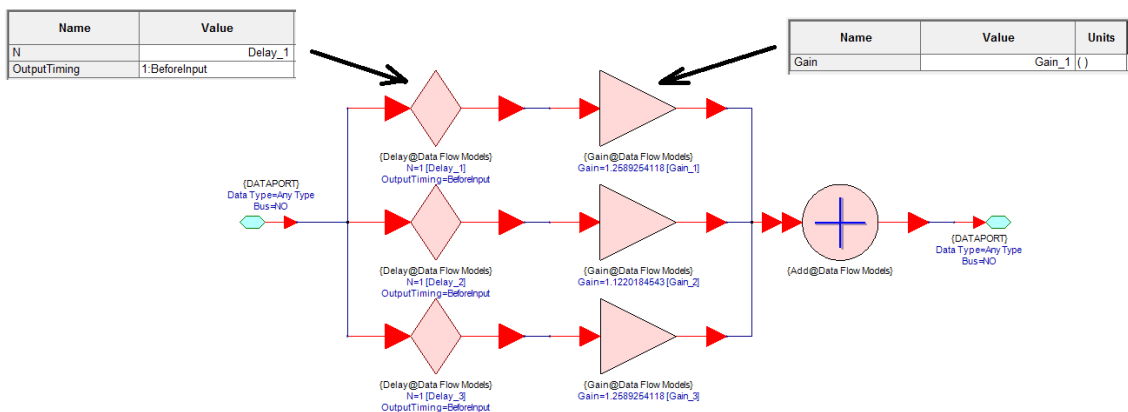


Рисунок 9.5 – Схема модели многолучевого канала РРВ

Блок *Delay* отвечает за задержку каждого луча на N отсчетов, а блок *Gain* отвечает за ослабление луча на трассе на K дБ. В параметрах подсистемы укажите 6 переменных, по одной величине задержки и ослабления в дБ (!) для каждого луча так, как показано на рисунке 9.6

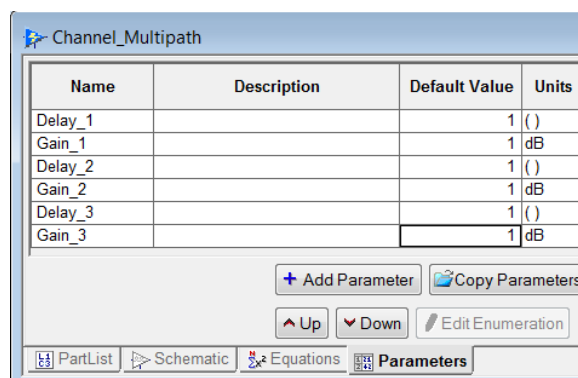


Рисунок 9.6 – Параметры подсистемы

Добавьте созданную подсистему на схему модели *OFDMA_Eq* после подсистемы канала с АБГШ (*Channel_AWGN*). Задайте параметры для многолучевого канала в поле уравнений (Equations) схемы *OFDMA_Eq* после уже имеющихся параметров. Укажите переменные в блоке подсистемы *Channel_Multipath* (рис. 9.7).

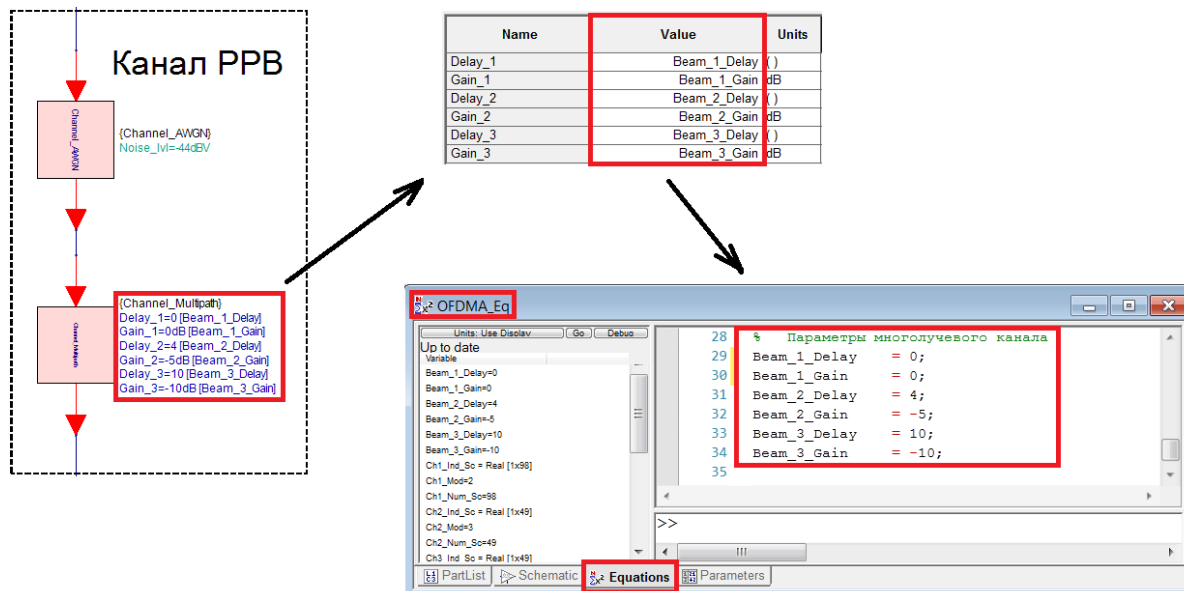


Рисунок 9.7 – Переменные подсистемы

Созданный канал PPB включает в себя мультипликативную и аддитивную помехи, которые всегда являются составляющей беспроводного канала связи. Для того чтобы наглядно оценить влияние канала на OFDMA-символ, постройте диаграммы созвездия символов модуляции с выхода канального селектора любого из 3-х каналов в приемнике для 3-х случаев: 1 – в канале присутствует только аддитивная помеха (исключите блок *Channel_Multipath*), 2 – в канале присутствует только мультипликативная помеха (исключите блок *Channel_AWGN*), 3 – в канале присутствует аддитивная и мультипликативная помехи. Для примера на рисунке 9.8 приведены диаграммы созвездий канала с QPSK модуляцией.

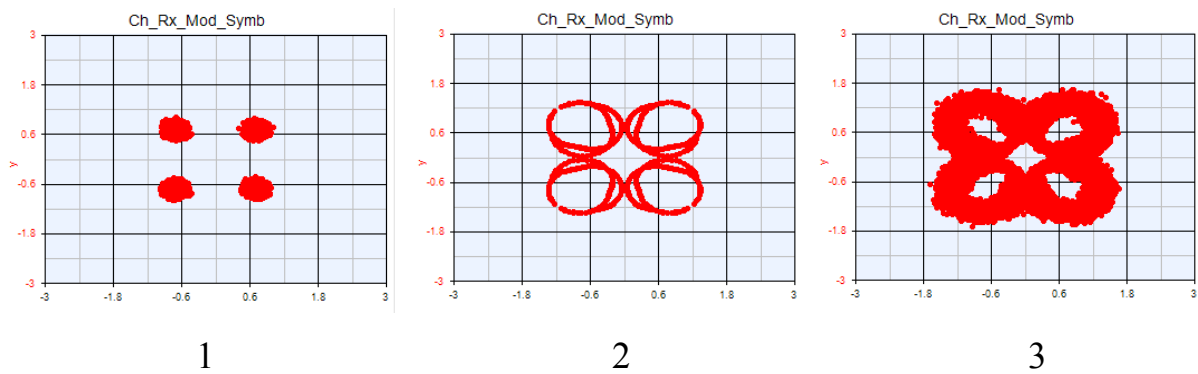


Рисунок 9.8 – QPSK созвездие с искажениями

При этом спектральная часть OFDMA-символа искажается (рис. 9.9).

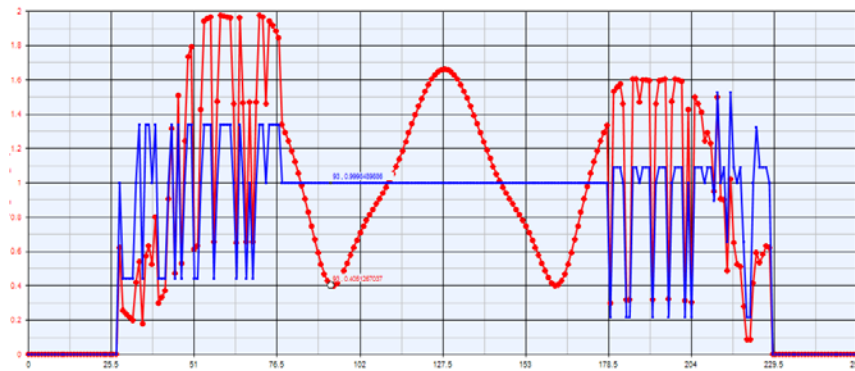


Рисунок 9.9 – Спектр принятого OFDMA-символа

На рисунке представлены отсчеты спектральной плотности мощности OFDMA-символа: 1 - до многолучевого канала распространения (синий); 2 – после многолучевого канала распространения (красный). Ясно, что, если не компенсировать искажения, корректная демодуляция данных становится невозможной. Для компенсации мультипликативной помехи используют опорные сигналы.

3. Формирование и добавление канала с опорными сигналами (пилотами)

Опорный сигнал служит для того, чтобы определить состояние канала передачи. Дело в том, что приемнику изначально известна форма и месторасположение опорного сигнала в ресурсной сетке. Приемник выделяет

опорный сигнал и измеряет разницу между изначальным сигналом и сигналом, прошедшим через канал. На основе этих измерений можно определить реакцию канала для остальных поднесущих и с помощью эквалайзирования уменьшить его влияние на искажение формы OFDM-символов.

Процесс формирования канала с опорными сигналами состоит из генерирования пилотов и расположения их в частотном домене OFDMA-символа. Схема представлена на рисунке 9.10.

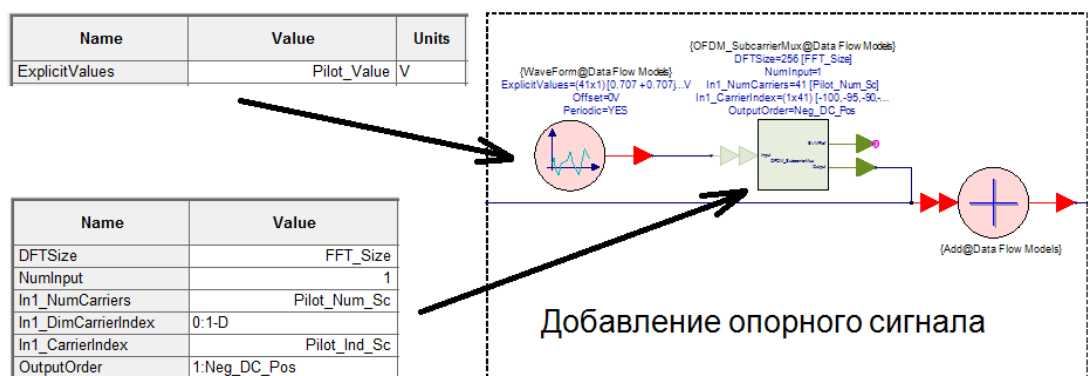


Рисунок 9.10 – Формирование опорного сигнала

Блок *WaveForm* формирует последовательность сигнальных отсчетов с заданными значениями. Блок *OFDM_SubcarrierMux* – уже знакомый канальный мультиплексор, расставляет отсчеты опорного сигнала в частотном домене. Так как OFDMA-символ состоит из комплексных спектральных отсчетов, то и значения пилотов должны быть заданы в комплексной форме. В данной работе условимся, что все пилоты будут иметь одинаковые комплексные значения. Переменные *Pilot_Value*, *Pilot_Num_Sc* и *Pilot_Ind_Sc* опишем в уравнении схемы *OFDMA_Eq* (рис. 9.11).

```

% --- Опорный канал ---
P_Step = 5;           % Период пилотов
P_Left = -100;       % Граница индексации пилотов слева
P_Right = 100;       % Граница индексации пилотов справа
Pilot_Ind_Sc = [P_Left:P_Step:P_Right]; % Индексация поднесущих
Pilot_Num_Sc = length(Pilot_Ind_Sc); % Количество пилотов
Pilot_Value(1:Pilot_Num_Sc,1) = 0.707 + 1i*0.707; % Значение пилотов

```

Рисунок 9.11 – Выражение для формирования опорного сигнала

(!) P_Step – период расположения пилотов в спектре OFDMA, т.е. если $P_Step = 5$, то каждая 5-я поднесущая будет являться пилотной поднесущей. P_Left и P_Right – левая и правая границы расположения пилотов (условие - P_Left и P_Right не должны превышать значения $FFT_Size/2$).

Чтобы пилотные поднесущие не накладывались на поднесущие с данными, нужно задать уравнение, по которому будут определяться индексы поднесущих каналов данных. Уравнение и пояснение для первого канала приведено на рисунке 9.12.

```

% ПЕРВЫЙ КАНАЛ
% Заполнение свободных от пилотов поднесущих в пределах [-50:50]
for i=-50:50 % Диапазон индексов поднесущих для 1-го канала
    if mod(i,P_Step) ~= 0 % Пропуск индексов пилотов
        k = k+1; % Счетчик
        Ch1_Ind_Sc(k) = i; % Запись индекса
    end; end; % Конец цикла
Ch1_Num_Sc = length(Ch1_Ind_Sc); % Количество используемых поднесущих
Ch1_Mod = 2; % Модуляция первого канала (QPSK)

```

Рисунок 9.12 – Определение индексов поднесущих для передачи данных

Укажите уравнения для остальных каналов самостоятельно (диапазон индексов возьмите [-100: -51] для 2-го канала и [51:100] для 3-го). Таким образом 3 канала с данными и опорный сигнал распределены по спектру. Спектральные отсчеты OFDMA-символа на входе OFDM-модулятора представлены на рисунке 9.13. Здесь отмечены пилотные поднесущие (синие) и поднесущие с данными (красные):

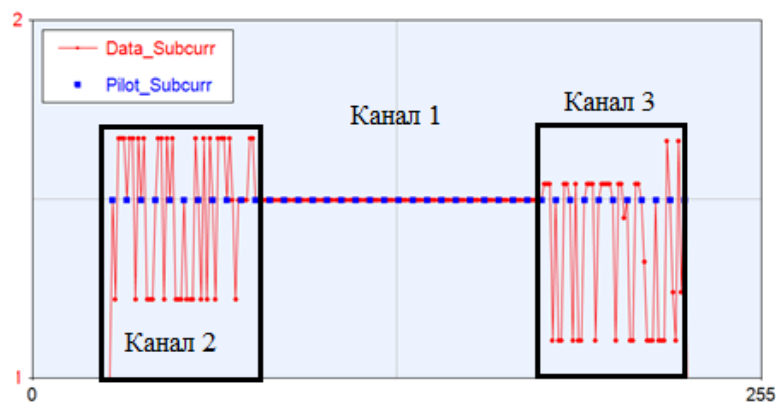


Рисунок 9.13 – Спектральные отсчеты OFDMA-символа

Полная схема формирования OFDMA-символа представлена на рисунке 9.14.

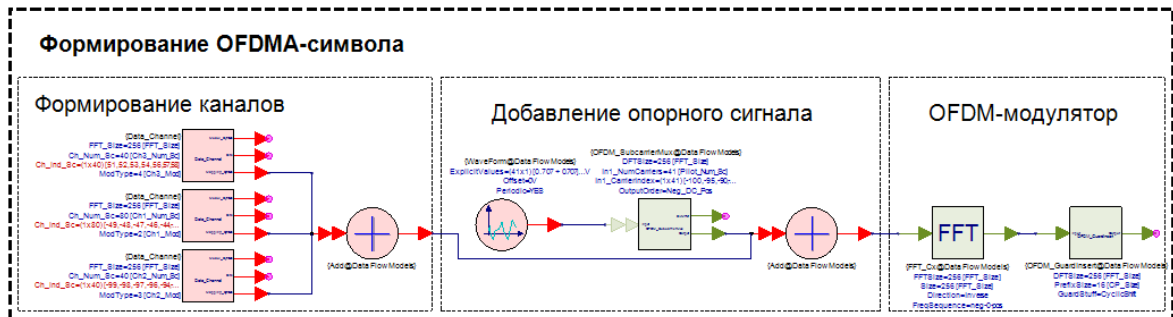


Рисунок 9.14 – Полная схема формирования OFDMA-символа с опорным сигналом

4. Эквалайзер

Задачей эквалайзера является коррекция частотно-селективных искажений в спектре OFDMA-символа. Схема генератора комплексно сопряженного опорного сигнала в приемнике изображена на рисунке 9.15.

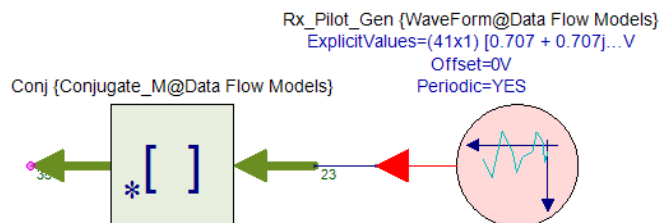


Рисунок 9.15 – Схема генератора комплексно-сопряженного опорного сигнала

Передаточная функция канала распространения вычисляется путем перемножения отсчетов комплексно-сопряженного сгенерированного в приемнике опорного сигнала и извлеченных после прямого преобразования Фурье отсчетов опорного сигнала принятого OFDMA-символа (рис. 9.16).

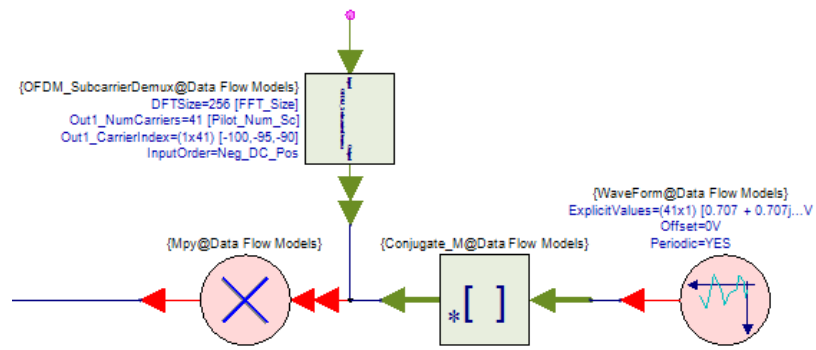


Рисунок 9.16 – Определение оценки передаточной функции канала

Так как передаточная функция канала определена только для 41-й поднесущей, требуется интерполировать (блок Interpolator) передаточную функцию на весь спектр OFDMA-символа.

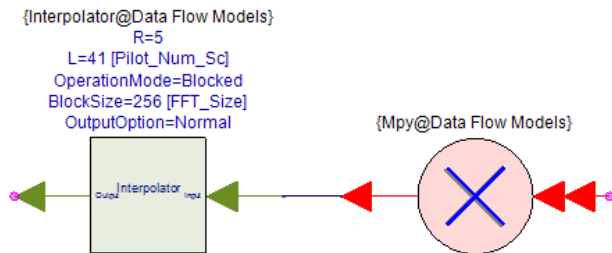


Рисунок 9.17 – Процедура интерполяции АЧХ канала

В параметрах интерполятора указываются значения, представленные на рисунке 9.18.

Name	Value	
R	Pilot_Step	Шаг расположения пилотов
L	Pilot_Num_Sc	Количество пилотов
Alpha	0.5	
SNR	100	
OperationMode	0:Blocked	Формирование выходных отсчетов в виде единого блока размером BlockSize
BlockSize	FFT_Size	
OutputOption	0:Normal	

Рисунок 9.18 – Параметры интерполятора

Далее спектр принятого OFDMA-символа перемножается с обратной интерполированной передаточной функцией канала. Для этого требуется взять

обратную функцию (блок Inverse_M - Model: InverseCx_M) от результата интерполяции и разместить его в спектре. Полная схема модели простейшего эквалайзера изображена на рисунке 9.19.

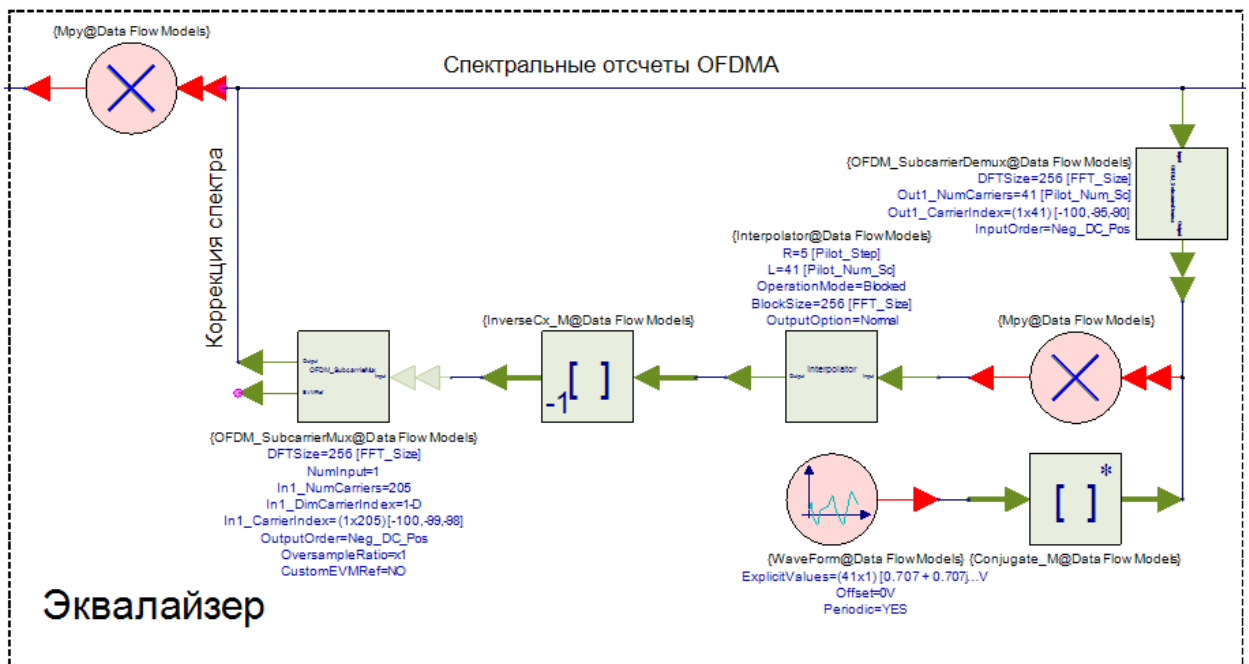
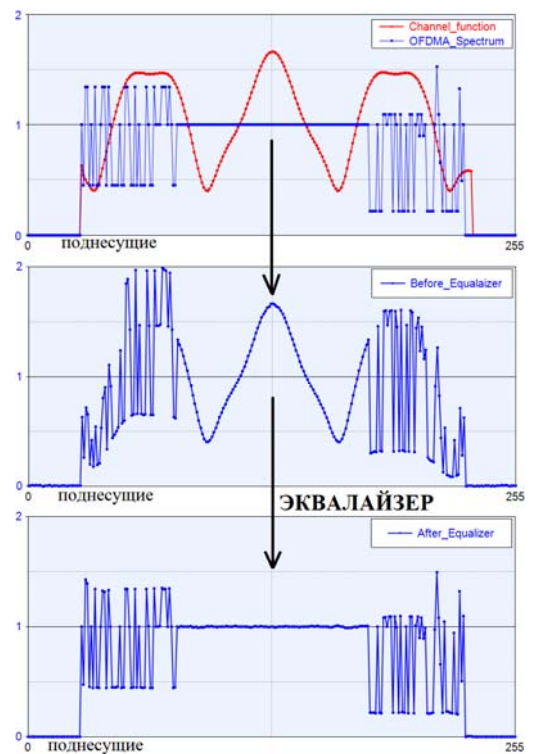


Рисунок 9.19 – Полная схема модели эквалайзера

Чтобы наглядно увидеть результат работы эквалайзера, постройте графики спектральной плотности мощности OFDMA-символа для 3-х случаев: 1) – в передатчике, 2) – в приемнике до эквалайзера; 3) – в приемнике после эквалайзера. На рисунках изображен процесс эквалайзирования. На первом графике видно, что на спектр OFDMA-символа накладывается функция канала распространения, в следствие чего появляются частотные искажения, нарушение условия ортогональности частот



поднесущих и, как следствие, амплитудные искажения из-за наложения соседних поднесущих друг на друга. Эквалайзер вычисляет передаточную функцию канала с помощью обработки опорного сигнала, после чего компенсирует влияние канала.

5. Обработка канальных данных

После процедуры эквалайзирования становится возможным корректная демодуляция данных в каждом канале. Обработка канальных данных остается такой же, как в предыдущей работе, посвященной OFDMA. Отсчеты с выхода эквалайзера поступают на вход канального селектора, который выбирает отсчеты соответствующего канала. Отсчеты с выхода канального селектора поступают на вход демодулятора. Канальный селектор и демодулятор уже реализованы в подсистеме Data_Channel_Demod. Добавьте (либо соедините, если добавлены) на схему 3 подсистемы и соедините вход каждой с выходом эквалайзера. С выхода Bits – демодулированные биты сообщения, с выхода Modul_Symbols – отсчеты с канального селектора (рис. 9.20).

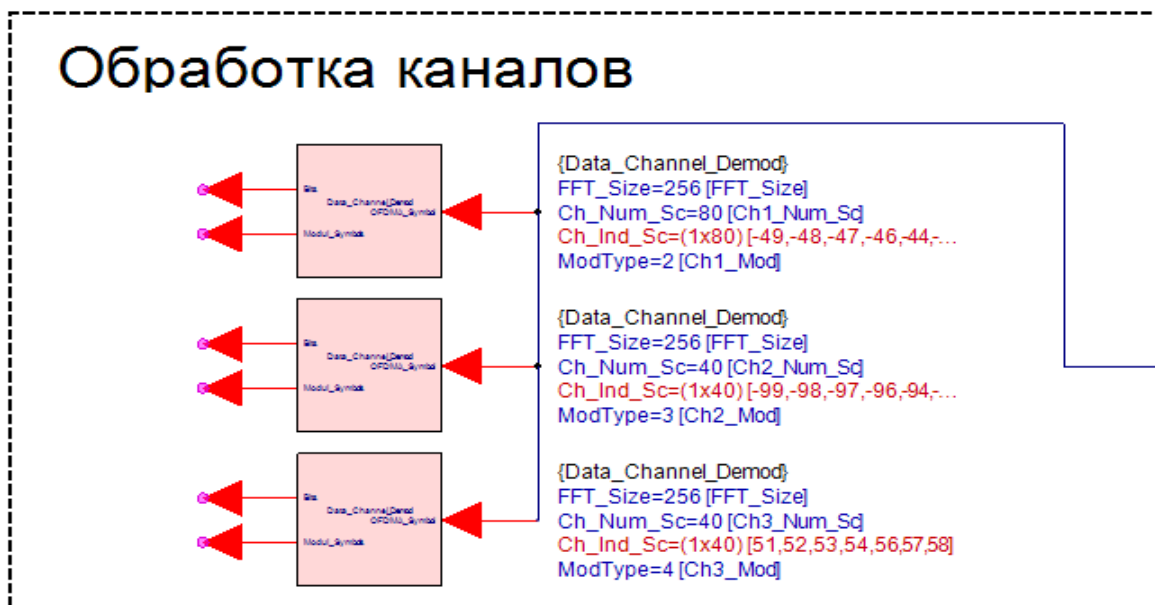


Рисунок 9.20 – Обработка пользовательских каналов OFDMA

Полная схема OFDMA-приемника изображена на рисунке 9.21.

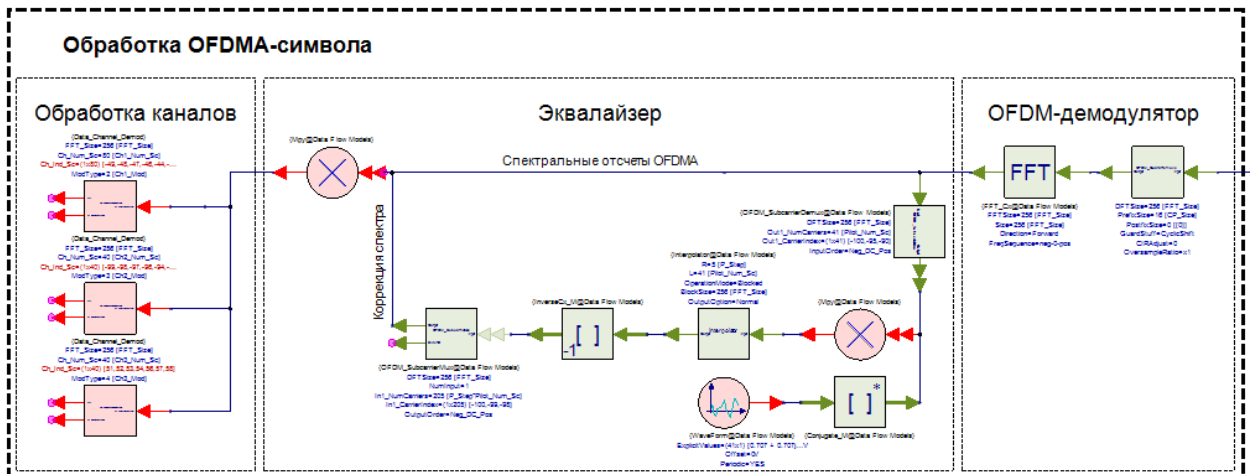


Рисунок 9.21 – Полная схема модели OFDMA-приемника

Постройте диаграмму созвездия с выхода селектора любого канала для 2-х случаев: до (сразу после OFDM-демдулятора) и после эквалайзера. Для примера приведена диаграмма созвездия с выхода селектора первого канала. Как видно из рисунка, эквалайзер компенсирует часть фазовых искажений, однако, не компенсирует аддитивную помеху (рис. 9.22).

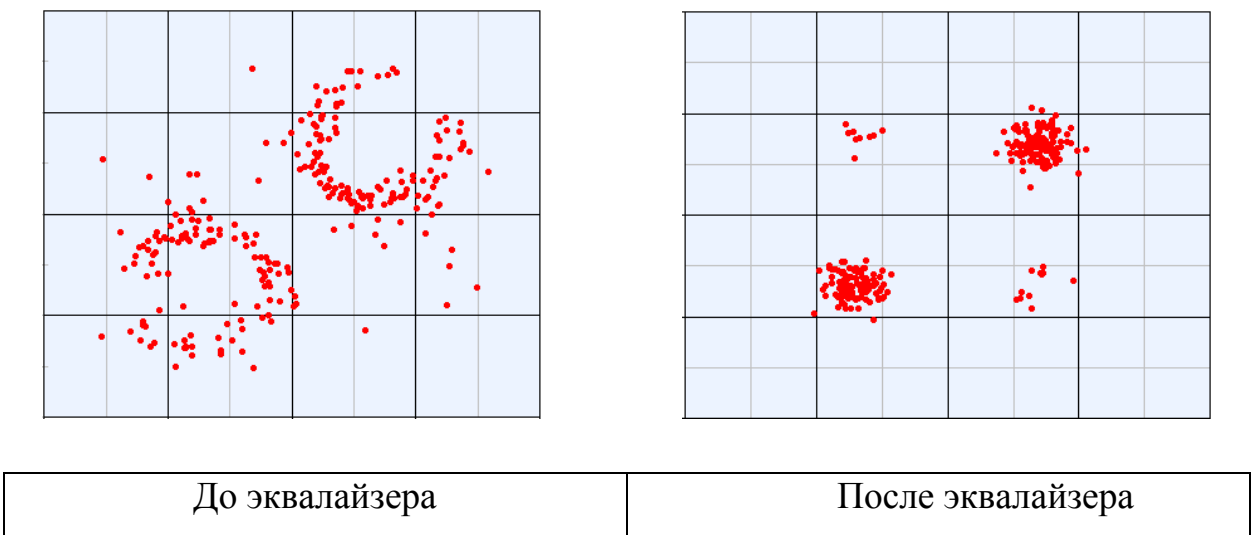
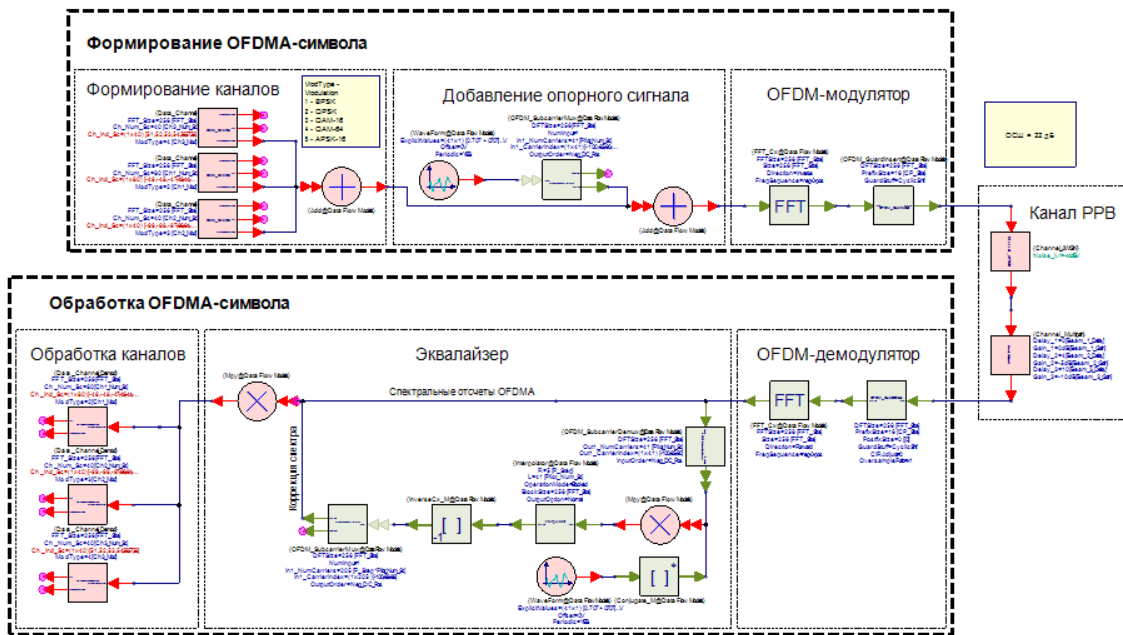


Рисунок 9.22 – Созвездие принятого QPSK сигнала до и после эквалайзера

Приложение “Полная схема модели”



Лабораторная работа №4 “Временная синхронизация в OFDM”

Цель работы

Целью работы является изучение способа синхронизации в современных многоканальных системах радиодоступа на примере системы беспроводного доступа LTE.

Введение

Для процедуры поиска соты и выполнения временной синхронизации в системах связи LTE предусмотрено использование сигналов первичной (PSS – Primary Synchronization Signal) и вторичной (SSS – Secondary Synchronization Signal) синхронизации. Процедура синхронизации выполняется АУ в два этапа: на первом этапе используется сигнал первичной синхронизации PSS, на втором этапе – сигнал вторичной синхронизации SSS с учетом результатов первого этапа. Структура сигнала первичной синхронизации PSS такова, что его обработка позволяет оценить не только временное положение слота в пределах радиотрейма, но и значение идентификатора сектора c в пределах соты. Согласно стандарту 3GPP LTE последовательность $d_u(n)$ для сигнала первичной синхронизации PSS формируется на основе последовательностей Задова-Чу с корнями $u = [25, 29, 34]$ в частотной области следующим образом:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{-j\pi u n(n-1)/63} & n = 1, 2, \dots, 31 \\ e^{-j\pi u (n+1)(n)/63} & n = 32, 33, \dots, 62 \end{cases},$$

где u – корень последовательности. Всего существует 3 отличных друг от друга сигнала первичной синхронизации, что соответствует 3-ем корням

последовательности Задова-Чу. Каждый корень строго определен в документации LTE и соответствует своему $N_{ID}^{(2)}$.

$N_{ID}^{(2)}$	Корень последовательности u
0	25
1	29
2	34

Сигнал первичной синхронизации PSS передается в шести центральных ресурсных блоках, что соответствует 72-м поднесущим. При этом сигнал первичной синхронизации PSS формируется в частотной области путем отображения последовательности $d_u(n)$ на 62 центральные поднесущие, расположенные симметрично относительно поднесущей нулевой частоты, которая не используется. Такая структура сигнала PSS позволяет АУ обрабатывать этот сигнал, используя дискретное преобразование Фурье длиной 64, и выполнять синхронизацию в сети без априорного знания выделенной для системы полосы частот. Структура сигнала PSS в частотной области представлена на рисунке 10.1.

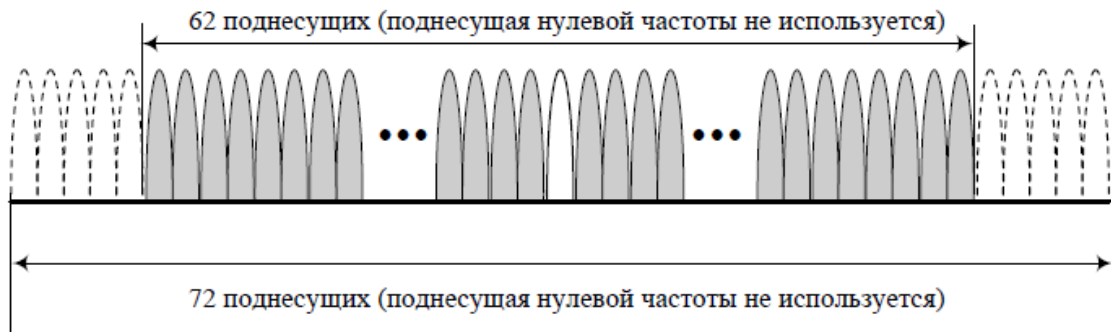


Рисунок 10.1 – Структура PSS сигнала

Временное представление сигналов PSS можно получить, используя обратное дискретное преобразование Фурье длиной 64 от значений последовательности, отображенной на поднесущие. Для этого к 62-м

символам последовательности необходимо добавить справа и слева по элементу с нулевым значением амплитуды.

Следует отметить, что выбор последовательностей Задова–Чу для сигналов первичной синхронизации PSS обусловлен тем, что как сами последовательности, так и их преобразования Фурье имеют постоянную амплитуду и «идеальные» автокорреляционные функции. Указанный набор корней для последовательностей Задова–Чу выбран по результатам оптимизации формы частотно-временной функции неопределенности сигналов PSS. Для данного набора корней сечение функции неопределенности в области максимума по оси частот слабо зависит от величины частотной расстройки, что позволяет при выполнении процедуры начальной временной синхронизации легко обнаруживать эти сигналы при частотных расстройках вплоть до $\pm 7,5$ кГц.

Для выполнения процедуры синхронизации стандартом LTE предусмотрена специальная структура кадра, в которую включен сигнал PSS во временной области:

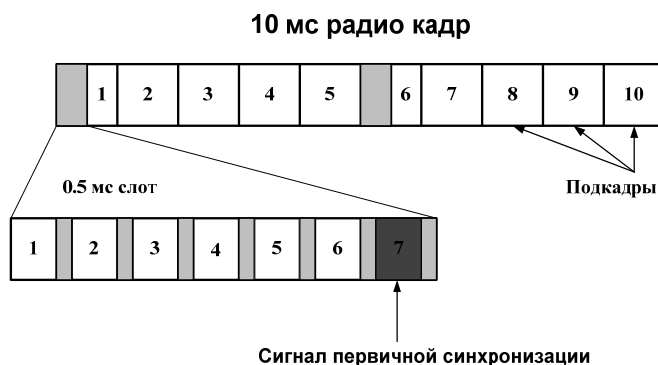


Рисунок 10.2 – Расположение сигнала PSS во временной области

Первый этап процедуры синхронизации оценка временного положения слота и идентификатора сектора (Sector-ID) $N_{ID}^{(2)}$ – выполняется некогерентно с помощью сигналов первичной синхронизации PSS. Необходимо отметить, что данная процедура в силу структуры сигнала PSS оказывается

инвариантной к типу (длине) циклического префикса и позволяет определить временное положение слота и тем самым начало кадра с неопределенностью до половины кадра. Решающее правило для определения временного положения слота и идентификатора сектора $N_{ID}^{(2)}$, полученное с использованием критерия максимального правдоподобия, имеет вид:

$$\hat{m}_u = \arg \max \left| \sum_{i=0}^{N-1} Y(i) S_u^*(i) \right|, u = 25, 29, 34,$$

где \hat{m}_u - индекс отсчета, соответствующего спектральному положению окончания сигнала PSS, i – спектральный индекс отсчета, N – длина сигнала первичной синхронизации PSS во спектральной области (в отсчетах), $Y(i)$ – i -й отсчет принимаемого сигнала, $S_M(i)$ – i -й отсчет копии сигнала первичной синхронизации PSS с корнем u в спектральной области, $()^*$ - символ операции комплексного сопряжения. При этом сама процедура оценки на основе решающего правила может быть реализована, например, с помощью корреляторов. Следует отметить, что опорные последовательности Задова–Чу с корнями 29 и 34 являются комплексно сопряженными по отношению друг к другу. Поэтому их обработка возможна с применением одного коррелятора, что позволяет снизить ее сложность. Результат поиска последовательности PSS изображен на рисунке 10.3.

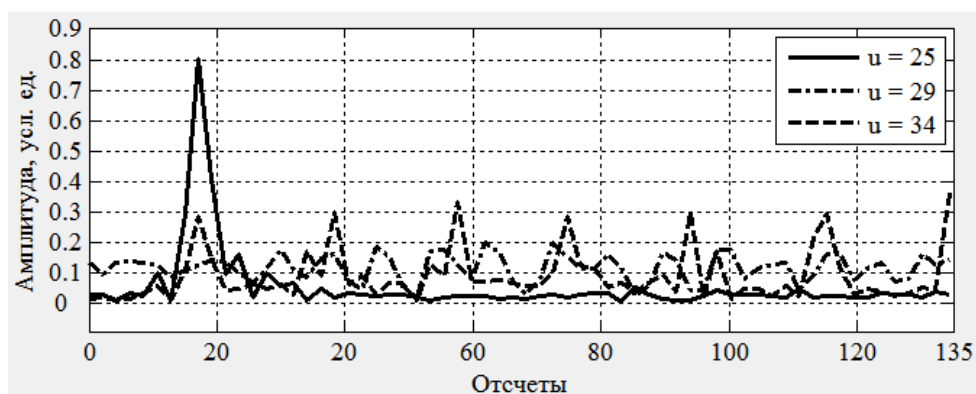


Рисунок 10.3 – Результат обработки PSS сигнала

В процессе выполнения данной лабораторной работы реализована модель формирования OFDMA и SC-FDMA сигналов. Произведен расчет и сравнение ПИК-факторов обоих сигналов.

Второй этап синхронизации – оценка временного положения начала кадра, идентификатора соты, режима дуплекса и типа циклического префикса – выполняется по сигналам вторичной синхронизации SSS с учетом результатов первого этапа.

Ход лабораторной работы

Приведенная методология работы по созданию модели физического уровня стандарта беспроводной широкополосной связи 3GPP LTE в системе SystemVue предполагает выполнение предыдущих практических работ.

1. Создание нового проекта и настройка симуляции

Создайте новый проект, используя пустое рабочее пространство *Blank*. Сохраните новый проект под именем LTE. Переименуйте файлы проекта: *Design1 Analysis* > *LTE_Analisys*, *Design1* > *LTE_Schematic*. В файле *LTE_Analisys* установите параметры симуляции: частоту дискретизации – 30.72 МГц, количество отсчетов – 25000. В поле уравнений схемы укажите постоянные параметры модели: *FFT_Size* = 128 и *CP_Size* = 10.

2. Формирование канала первичной синхронизации

Одним из основных параметров модели будет являться идентификатор (уникальный номер) базовой станции – N_{ID}^{Cell} , который принимает значения 0..503 и описывается выражением:

$$N_{ID}^{Cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)},$$

где $N_{ID}^{(1)}$ - номер группы базовой станции, который может принимать значения 0..167 и передается вместе с сигналом вторичной синхронизации; $N_{ID}^{(2)}$ - номер идентификатора сектора, который принимает значения 0..2 и передается вместе с сигналом первичной синхронизации.

Создайте новый параметр модели – идентификатор базовой станции *Cell_ID* (поставьте галочку *Tune*). В поле уравнений напишите выражения

(рис. 10.4), по которым вычисляются $N_{ID}^{(1)}$ и $N_{ID}^{(2)}$ (в модели – Cell_ID_1 и Cell_ID_2).

```
Cell_ID_1 = floor(Cell_ID/3);
Cell_ID_2 = Cell_ID - 3*Cell_ID_1;
```

Рисунок 10.4 – Выражения для расчета CellID

Математическое выражение для сигналов синхронизации было представлено ранее. Для генерирования банка последовательностей синхронизации воспользуйтесь полем уравнений Equation схемы в модели и запишите выражение, представленное на рисунке 10.5.

```
u = [25 29 34]; %БАНК КОРНЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
for j=1:3 %ПЕРЕЧИСЛЕНИЕ КОРНЕЙ
    for n=1:31 %ПЕРЕЧИСЛЕНИЕ ОТСЧЕТОВ
        % ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПСП
        Z_Chui(n,j) = exp((-1i*pi*u(j)*n*(n-1))/63);
        Z_Chui(n+31,j) = exp((-1i*pi*u(j)*(n+31)*(n+32))/63);
    end; end;
```

Рисунок 10.5 – Выражение для формирования ПСП Задова-Чу

Найдите в библиотеке и добавьте на схему блок генерирования сигналов произвольной формы *WaveForm* и подсоедините к его выходу блок сбора данных *Sink*. В параметрах генератора укажите значения выходного вектора $Z_Chu(:,Cell_ID_2+1)$.

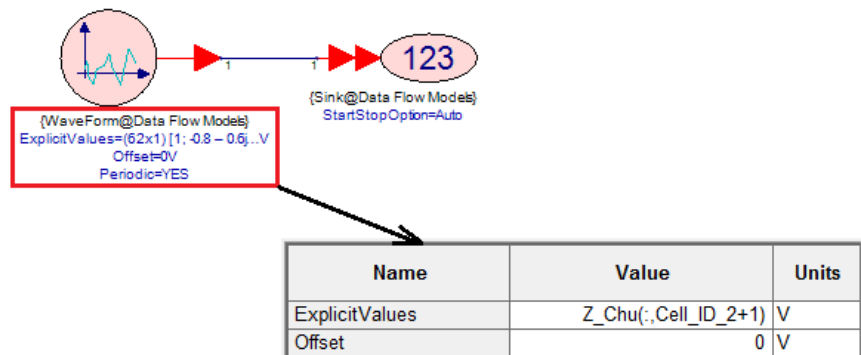


Рисунок 10.6 – Блок *Waveform*

Это означает, что с выхода генератора будет выбирать одну последовательность из банка в зависимости от номера базовой станции N_{ID}^{Cell} и номеру идентификатора сектора $N_{ID}^{(2)}$. Отобразите 62 отсчета реальной и мнимой частей последовательности на одном графике и убедитесь, что при изменении параметра N_{ID}^{Cell} - изменяется вид последовательности (рис. 10.7).

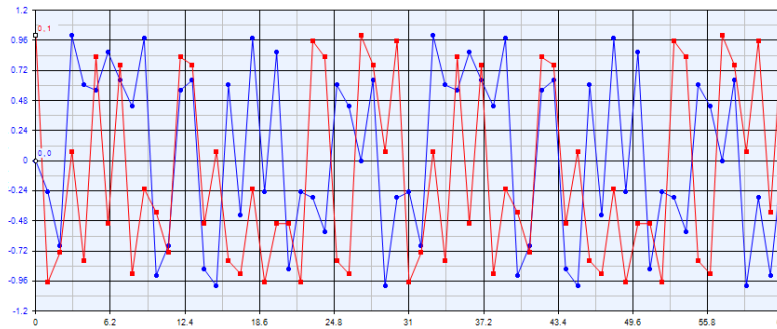


Рисунок 10.7 – ПСП Задова-Чу

Последовательность первичной синхронизации располагается в середине частотного домена и занимает центральных 62 спектральных отсчета или полосу ~ 1 МГц. Далее, с помощью ОДПФ формируются временные отсчеты сигнала и добавляется циклический префикс (рис. 10.8).

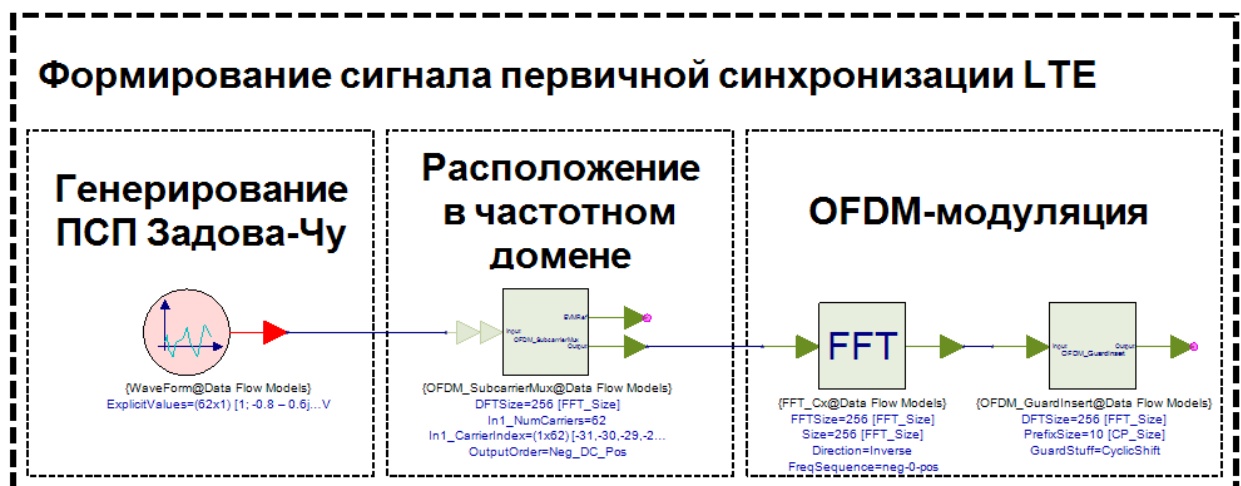


Рисунок 10.8 – Схема формирования сигнала PSS

3. Обработка канала первичной синхронизации

Первым делом в приемнике осуществляется демодуляция OFDM-символа и селекция спектральных отсчетов сигнала синхронизации (рис. 10.9).

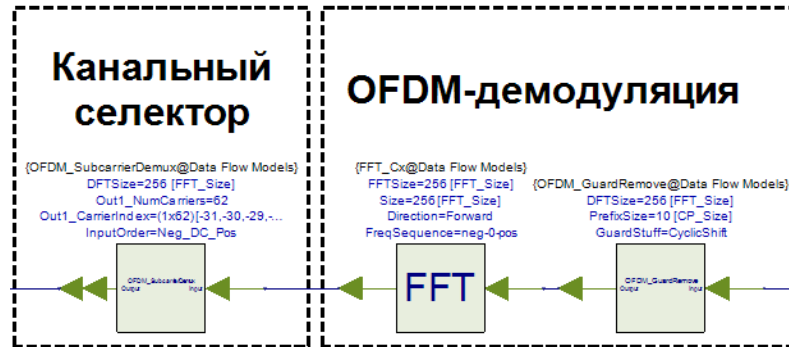


Рисунок 10.9 – OFDM-демодуляция и селекция PSS сигнала

Вторым шагом является поиск номера переданной БС последовательности путем расчета функции взаимной корреляции принятой последовательности и комплексно-сопряженными последовательностями из банка. Добавьте и соедините последовательно блоки *WaveForm* (в параметрах укажите *ExplicitValues> PSS_Value*) и *Conjugate*, которые отвечают за генерирование комплексно-сопряженной ПСП (рис. 10.10). Объедините добавленные элементы в подсистему *LTE_XCorr_PSS*. (!) В подсистеме создайте параметр *PSS_Value*.

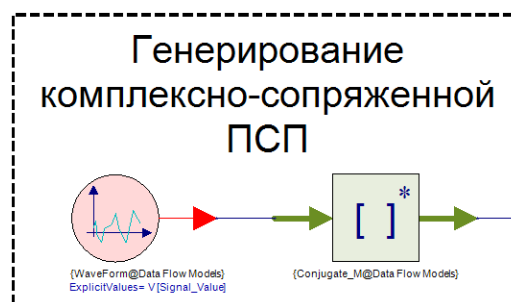


Рисунок 10.10 – Формирование комплексно-сопряженного сигнала

Расчет ВКФ между спектральными отсчетами принятого и сгенерированного сигнала. Добавьте блоки *Mpy*, *FFT_Cx* (параметры: *FFTSize*, *Size* = 62 (длина ПСП), *Direction* > *Inverse*, *FreqSequence* > *neg_0_pos*), *Math* (параметры: *Model* > *MathCx*, *FunctionType* > *Abs*). Порт *Signal_in* – вход для отсчетов принятого сигнала и порт *XCorr* – выход функции корреляции (рис. 10.11).

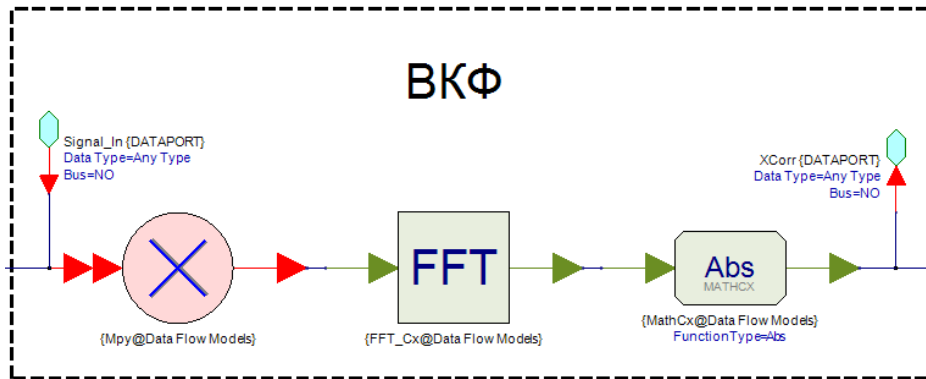


Рисунок 10.11 – Взаимно-корреляционная функция

Определение максимального значения функции ВКФ и соответствующего отсчета максимального значения. Добавьте блок *MaxMin* (параметр: *N* = 62, *MaxOrMin* > *max*) и два выходных порта: порт *Max_Index* – выход индекса отсчета максимального значения и *Max_Value* – максимальное значение ВКФ. Элемент *MaxMin* считывает по *N* отсчетов и определяет максимальное значение и его индекс (рис. 10.12).

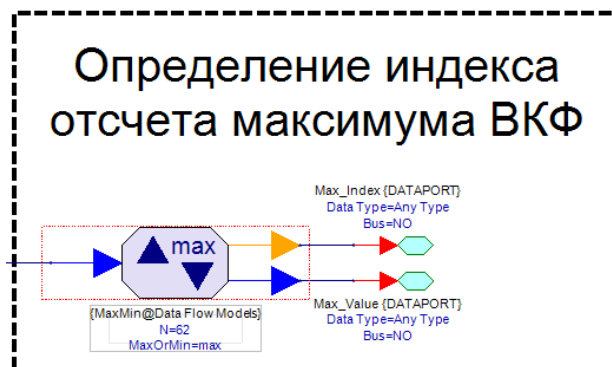


Рисунок 10.12 – Определение максимума

Полная схема подсистемы обработки сигнала первичной синхронизации представлена на рисунке 10.13.

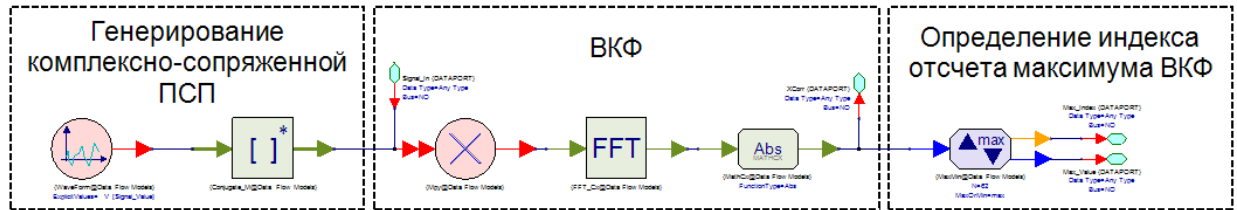


Рисунок 10.13 – Полная схема подсистемы

Добавьте на схему *LTE_Schematic* после канального селектора три подсистемы *LTE_XCorr_PSS* с параметрами $PSS_Value > Z_Chu(:,1)$, $Z_Chu(:,2)$ и $Z_Chu(:,3)$ соответственно как показано на рисунке. На выходе каждой подсистемы сформируются отсчеты ВКФ входного сигнала с сигналами из банка, максимальное значение этой ВКФ и индекс отсчета максимального значения. Сравнивая между собой максимальные значения ВКФ, мобильная станция обнаруживает ту последовательность, которая была передана базовой станцией. Отобразите на одном графике 62 отсчета функции всех трех ВКФ с выхода подсистемы *XCorr* (рис. 10.14).

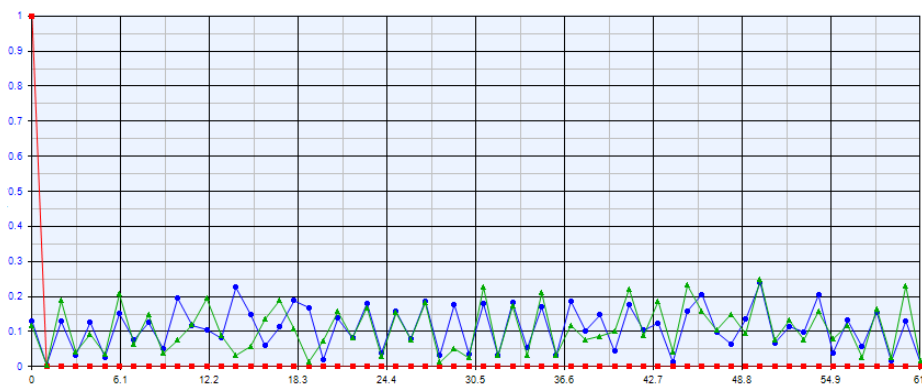


Рисунок 10.14 – Результат ВКФ

Из графика видно, что только одна из 3-х функции ВКФ имеет максимальный выброс. Попробуйте изменить параметр N_{ID}^{Cell} в модели и

увидите, как функция с максимальным выбросом будет изменяться. Сравнение функции ВКФ и определение задержки можно реализовать в виде схемы, представленной на рисунке 10.15.

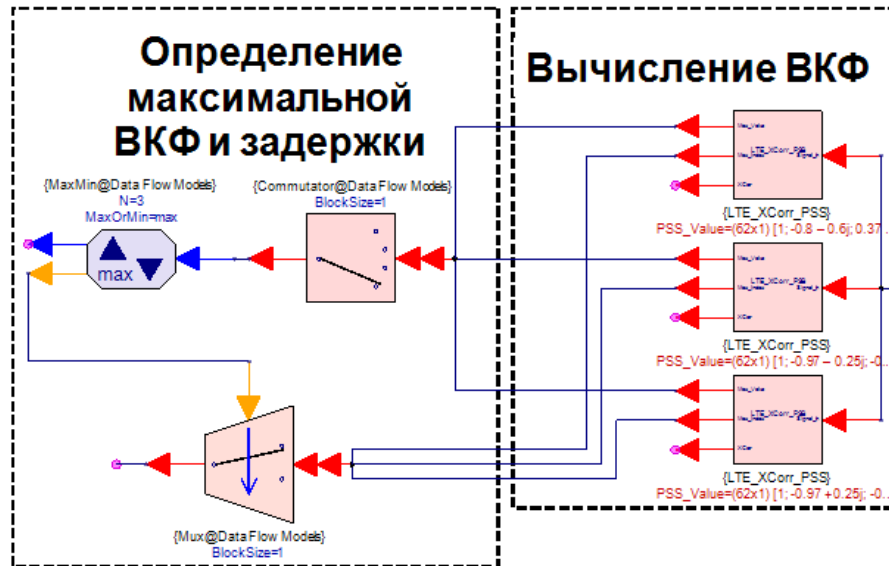


Рисунок 10.15 – Вычисление ВКФ и определение максимальной задержки

Блок *Commutator* считывает по очереди с выхода *Max_Value* максимальные отсчеты ВКФ и подает на блок *MaxMin*, который сравнивает их между собой. Номер максимальной ВКФ поступает на управляющих вход мультиплексора *Mux*, который определяет с какого выхода *Max_Index* 3-х подсистем *LTE_XCorr_PSS* получать информацию о индексе максимального отсчета. Индекс максимального отсчета соответствует времени распространения сигнала. Например, если индекс $i = 3$, соответственно время распространения сигнала в канале:

$$t_{распр} = i \cdot T_s = 3 \cdot 32,5(нс) = 97,5(нс)$$

где T_s – время одного отсчета LTE. Полная схема модели без канала передачи представлена на рисунке 10.16.

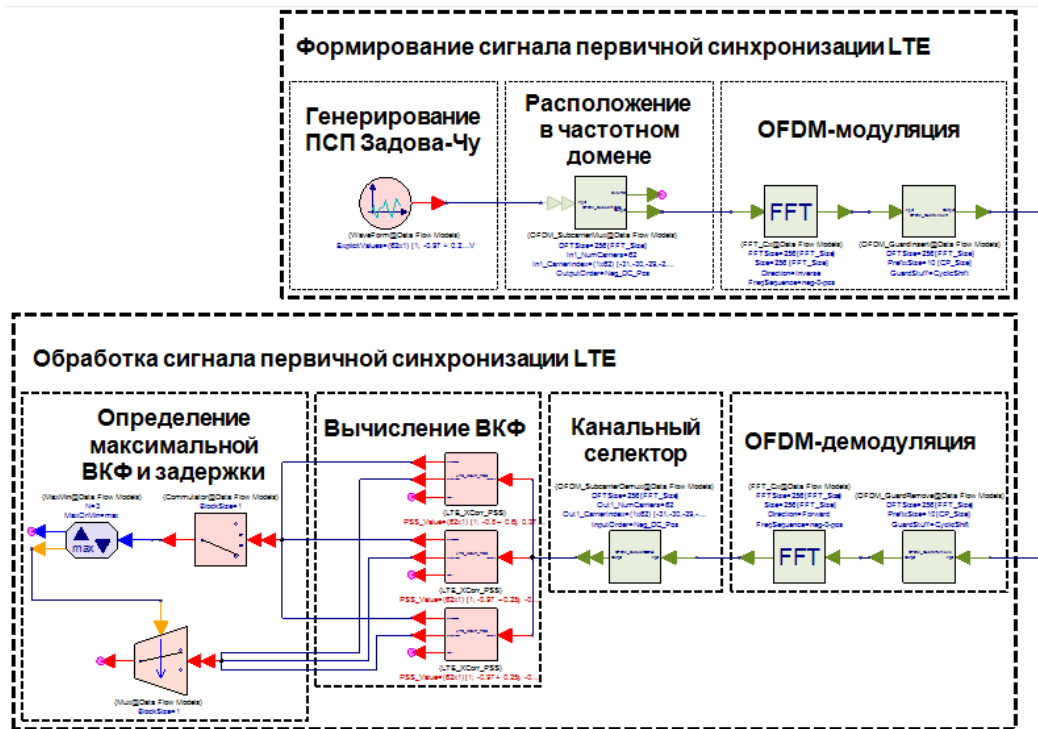


Рисунок 10.16 – Полная схема модели OFDMA

4. Анализ данных

4.1 Измерение времени распространения сигнала

Добавьте блок задержки Delay между OFDM-модулятором и OFDM-демодулятором. Снимайте данные с выхода мультиплексора с помощью блока Sink. Создайте в каталоге проекта новый файл уравнения Equation, назовите его *Time_Delay* и запишите в него программный код, представленный на рисунке 10.17.

```

% Расчет времени распространения сигнала Time_Delay
using('FILE_NAME'); % FILE_NAME - название вашего файла-таблицы,
                    % в который записываются данные
Ts = 32.5;          % Время одного отсчета в LTE (нс)
Time_Delay = VAR_NAME(1)*Ts; % VAR_NAME - название переменной
                    % с выхода мультиплексора Mux

```

Рисунок 10.17 – Программный код файла *Time_Delay*

Выведите на схему результат вычисления в виде текста (рис. 10.18).

Время распространения (нс) =	32.5
------------------------------	------

Рисунок 10.18 – Вывод результата расчета

При изменении параметра задержки N в блоке *Delay* наблюдается сдвиг максимального значения ВКФ пропорционально N (рис. 10.19).

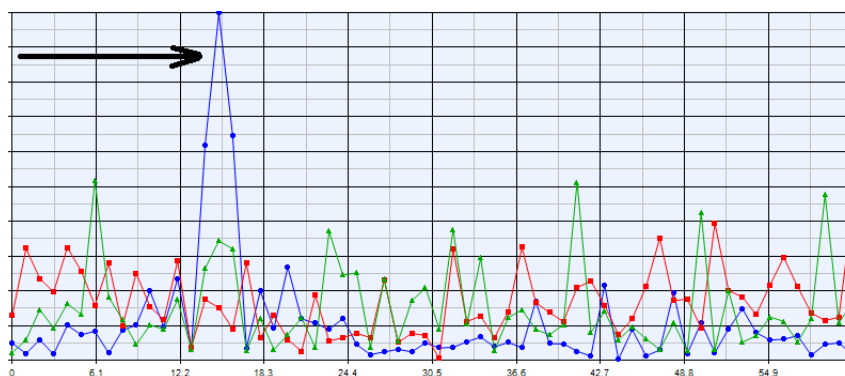


Рисунок 10.19 – Сдвиг пика ВКФ

4.2 Измерение помехоустойчивости сигнала первичной синхронизации

В любой системе связи процедура синхронизации играет важнейшую роль, поэтому сигналы синхронизации в LTE имеют повышенную помехоустойчивость.

Добавьте до блока задержки *Delay* подсистему *Channel_AWGN* из ранее созданной собственной библиотеки. Создайте в каталоге проекта новый файл уравнения *Equation*, назовите его *SNR_Measurent*. Добавьте 2 блока сбора данных *Sink* до и после *Channel_AWGN*. В файле *SNR_Measurent* нужно написать выражение для расчета отношения сигнал/шум в канале передачи (рис. 10.20).

```

using('FILE_NAME'); % FILE_NAME - название вашего файла-таблицы,
|                   % в который записываются данные
% X - сигнал до Channel_AWGN (Данные с Sink 1)
% Y - сигнал после Channel_AWGN (Данные с Sink 2)
% MSE - среднеквадратичная ошибка
% P - мощность сигнала до Channel_AWGN
% SNR - отношение сигнал/шум
MSE = sum((real(X)-real(Y)).^2 + (imag(X) - imag(Y)).^2)/length(X);
P = sum(real(X).^2 + imag(X).^2)/length(X);
SNR = 10*log10(P/MSE);
SNR = round(SNR); % Округление

% Запись переменной SNR в Dataset
setvariable('LTE_Analysis_LTE_Schematic_Data','SNR',SNR);

```

Рисунок 10.20 – Программный код для расчета отношения сигнал/шум

Выведете на схему полученное отношение сигнал/шум в виде текстового окна (рис. 10.21).

Отношение сигнал/шум (дБ) =	7
-----------------------------	---

Рисунок 10.21 – Вывод результата расчета отношения сигнал/шум

Проведите измерение вероятности неправильного обнаружения сигнала вторичной синхронизации от отношения сигнал/шум в канале. Для этого добавьте на схему блок измерения вероятности ошибки *BER_FER* и блок генерирования константы *Const*, который подайте на вход REF. В параметрах *BER_FER* укажите: *StartStopOption* > *Samples*, *BitsPerFrame* = 10000. В параметрах блока *Const* укажите: *Value* = *Cell_ID_2*. Таким образом блок *BER_FER* сравнивает переданный и обнаруженный номер $N_{ID}^{(2)}$.

Рассчитайте зависимость вероятности неправильного обнаружения от ОСШ. Для этого нужно создать циклическую симуляцию (**sweep**) с изменяемым параметром уровня шума. Создайте файл Sweep и укажите параметры так, как показано на рисунке 10.22.

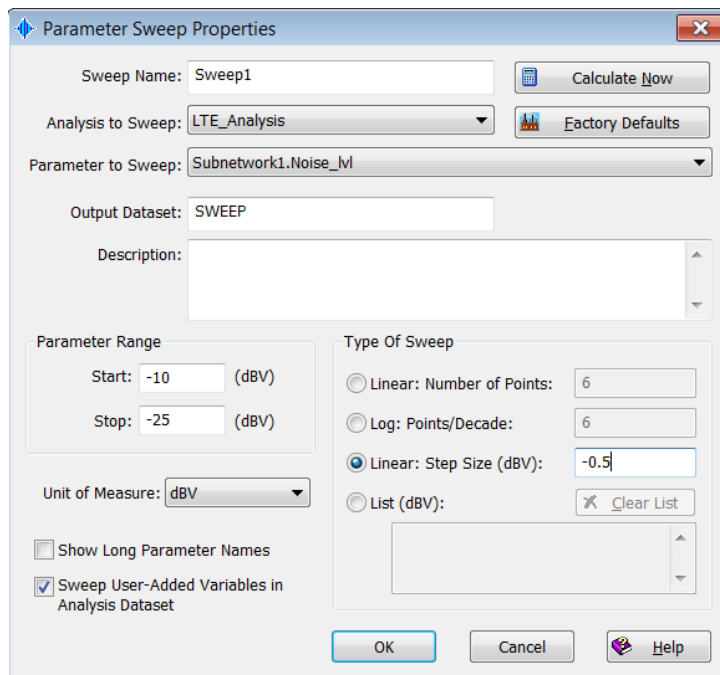


Рисунок 10.22 – Параметры sweер-файла

(!) При измерении уберите задержку в канале ($N=0$).

(!) Чтобы параметр *Noise_lvl* был доступен в пункте *Parameter to Sweep*, поставьте галочку *Tune* в параметрах подсистемы *Channel_AWGN*.

Постройте график зависимости (рис. 10.23) вероятности неправильного обнаружения от ОСШ (ось Y – логарифмическая)

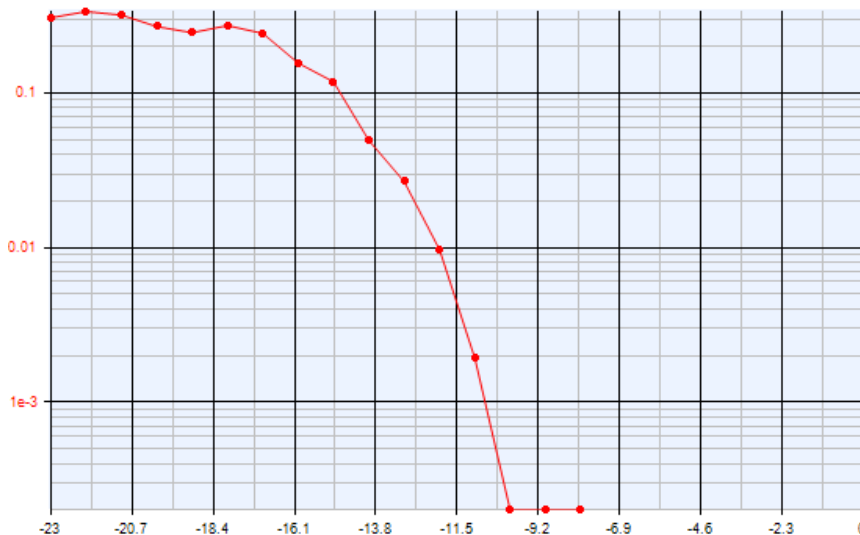
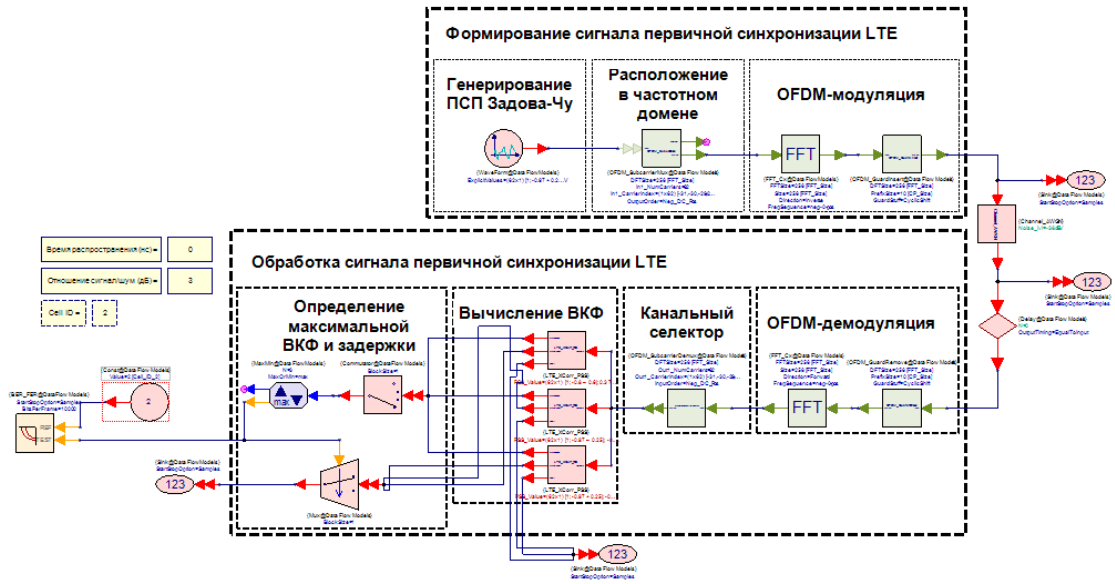


Рисунок 10.23 – Зависимость вероятности неправильного обнаружения

Приложение “Опорная полная схема модели”



Лабораторная работа №5 “Частотная синхронизация в OFDM”

Цель работы

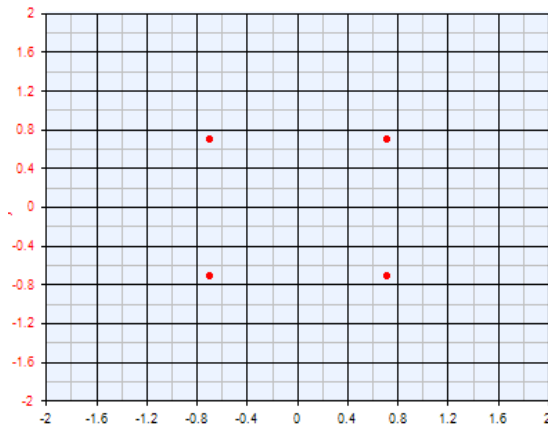
Целью лабораторной работы является изучение алгоритма частотной синхронизации в OFDM системах связи. В рамках работы предлагается смоделировать частотный сдвиг в OFDM-символе и по известному алгоритму произвести оценку частотного сдвига в SystemVue.

Введение

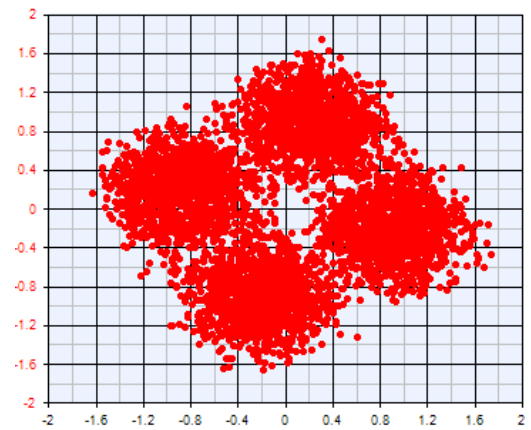
В большинстве современных систем беспроводной связи (Wi-MAX, LTE, Wi-Fi и др) используются технология OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Технология OFDM эффективна в многолучевом канале, при этом достаточно требовательна к временной и частотной синхронизации.

Частотная синхронизация необходима для того, чтобы передатчик и приемник работали на одной и той же частоте. Сдвиг частоты может быть вызван как доплеровским рассеянием из-за передвижения в пространстве передатчика/приемника или из-за отражения сигнала от подвижного объекта. Так же сдвиг частоты возможен из-за начальной рассинхронизации задающего генератора высокой частоты передатчика и приемника. Влияние частотного сдвига на OFDM-сигнал, поднесущие которого модулированы QPSK-модуляцией представлено на рисунке 11.1.

Отсутствие частотной синхронизации в OFDM сигнале приводит к нарушению условий ортогональности между поднесущими. Это приводит к наложению поднесущих друг на друга, что является причиной амплитудных искажений созвездия QPSK.



а) Созвездие OFDM QPSK без частотного сдвига



б) Созвездие OFDM QPSK с частотным сдвигом

Рисунок 11.1 - Созвездие QPSK сигнала, переданного в OFDM символе

Оценку частотного сдвига в OFDM-сигнале можно осуществить по принятой пилотной последовательности, состоящей из 2-х повторяющихся частей. Принятый пилотный сигнал может быть записан в следующем виде:

$$P_k = \sum_{n=1}^N X_n e^{i2\pi kn/N}$$

где: X_n – модулированная последовательность, N – размер преобразования Фурье. Обозначим первую половину пилотного сигнала как $P1 = P_k(1:N/2)$, а вторую половину как $P2 = P_k(N/2+1:N)$, причем $P1 = P2$. Грубая оценка частотного сдвига по пилотному сигналу может быть произведена любым известным методом, к примеру методом предложенным в [4], путем расчета ВКФ первой и второй половины пилотного сигнала:

$$R(l) = \text{ifft}(\text{fft}(P1(l)) \times \text{fft}(P2(l))^*),$$

где: ifft – операция обратного преобразования Фурье, fft – операция прямого преобразования Фурье, $*$ – знак комплексного сопряжения.

Расчет разности фаз производится по формуле:

$$\Delta\hat{\varphi} = \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}(R(l))}{\operatorname{Re}(R(l))} \right],$$

где: Im – мнимая часть, Re – реальная часть, для l соответствующему максимуму рассчитанной ВКФ. Грубый расчет ухода по частоте рассчитывается по формуле:

$$\Delta\hat{f}_{\text{груб}} = \frac{\Delta\hat{\varphi}}{\pi T},$$

где: T – длительность пилотной последовательности.

Далее производится операция устранения частотного сдвига (по грубой оценке), для каждого OFDM символа в кадре. Пусть кадр содержит N OFDM символов, тогда компенсация частотного сдвига для каждого OFDM символа в кадре производится согласно выражению:

$$g_j(k) = y_j(k) \cdot \exp(i \cdot k \cdot (-1) \cdot dphi),$$

где: $y_j(k)$ – j -ый OFDM символ в кадре ($j \in (1..N)$), k – порядковый номер отсчета сигнала, i – мнимая единица, $dphi = \frac{\Delta\hat{f}_{\text{груб}} \cdot 2 \cdot \pi}{f_d}$, f_d – частота дискретизации.

Ход лабораторной работы

В рамках лабораторной работы предлагается изучить алгоритм частотной синхронизации OFDM сигналов и создать модель, реализующую процедуру частотной синхронизации.

1. Создание проекта

Создайте новый проект, используя новое рабочее пространство *Blank*. Сохраните проект под именем *FSync*. Переименуйте файлы, приложенные к проекту: схему – в *Conv_Scheme*, а файл параметров симуляции – в *FSync Analysis*. В файле *FSync _Scheme* настройте параметры симуляции. Оставьте значение частоты дискретизации прежним (System Sample Rate) - 1 МГц. Количество отсчетов симуляции (Number of Samples) – 10000. Убедитесь, что в качестве схемы выбрана *FSync _Scheme*. Файл-таблицу для сбора данных назовите *FSync _Dataset* (поле Dataset). Параметры файла *FSync Analysis* представлены на рисунке 11.2.

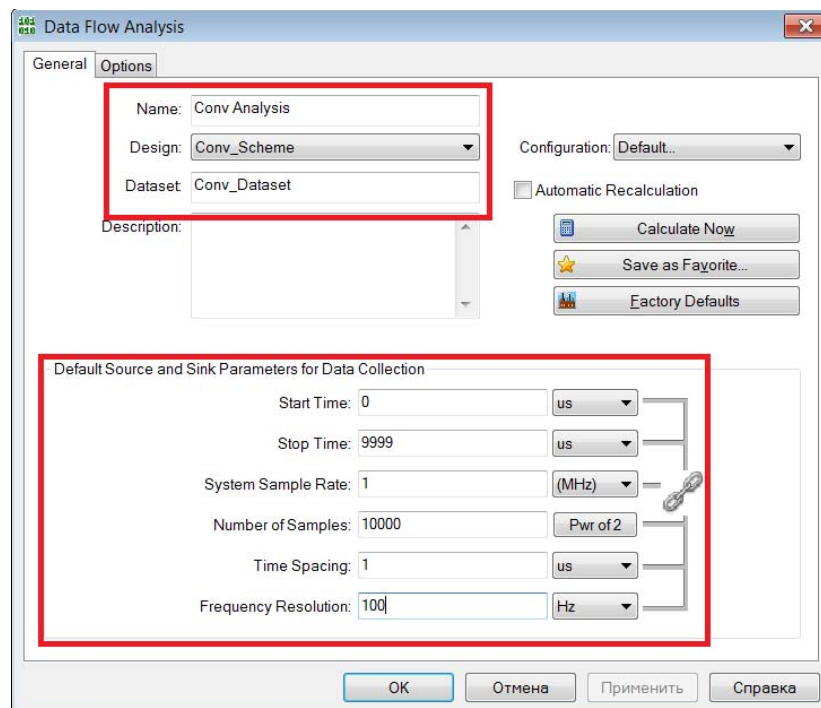


Рисунок 11.2 - Параметры файла FSync Analysis

2. Создание модели передатчика

Схема модели OFDM-передатчика представлена на рисунке 11.3. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

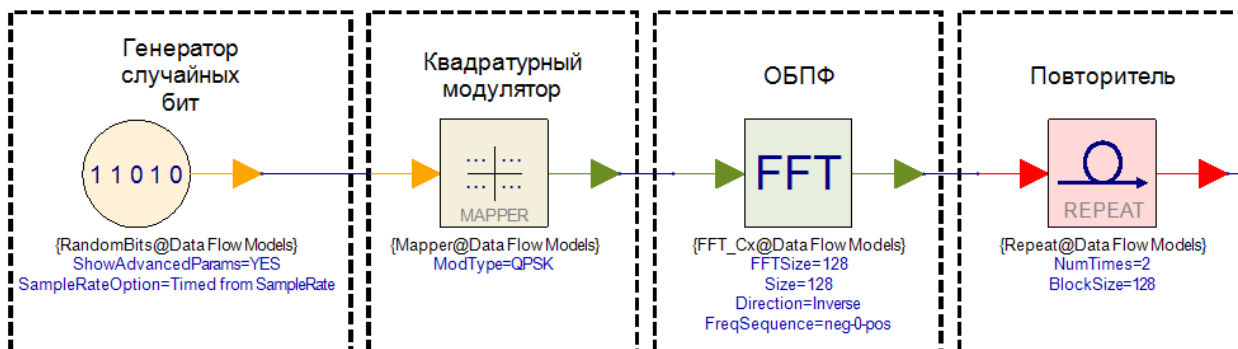


Рисунок 11.3 - Модель OFDM-передатчика

Блок *RandomBits* генерирует последовательность случайных бит, которые поступают на вход модулятора *Mapper*. Вид цифровой модуляции – QPSK. Далее поток символов модуляции преобразуется в OFDM-символ с помощью блока обратного преобразования Фурье – *FFT_Cx*. Компонента *Repeat* используется для того, чтобы послать друг за другом два одинаковых OFDM-символа.

3. Создание модели канала распространения с АБГШ

Добавьте новый параметр модели, который будет отвечать за отношение сигнал/шум в канале, назовите параметр *SNR*. Значение по умолчанию (Default Value) выставите 0. Схема модели канала распространения с АБГШ представлена на рисунке 11.4. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

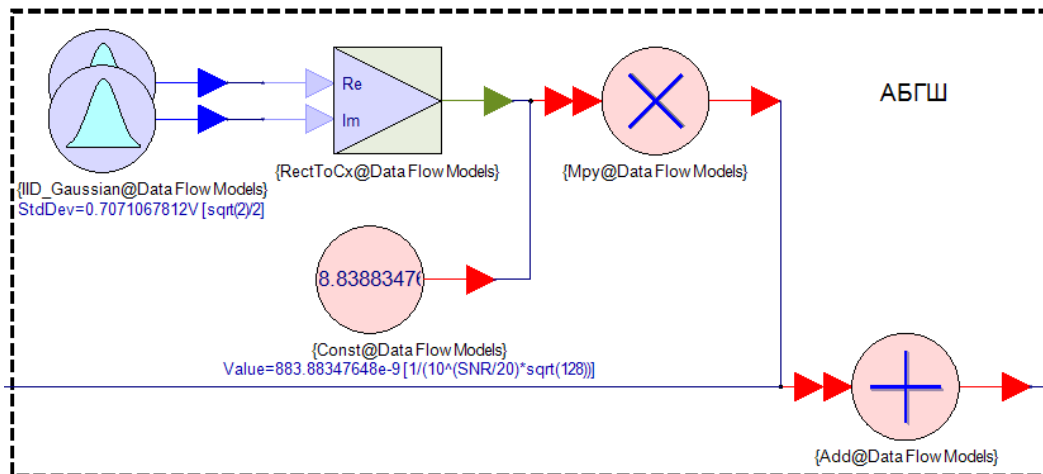


Рисунок 11.4 - Модель канала распространения с АБГШ

Два независимых генератора случайного напряжения *IID_Gaussian* формируют 2 вектора случайного вещественного сигнала по закону Гаусса, которые с помощью блока *RectToCx* объединяются в комплексный сигнал. Среднеквадратичное отклонение (параметр $\text{StdDev} = \sqrt{2}/2$). Комплексный случайный сигнал перемножается с коэффициентом, который формируется в компоненте *Const* и который зависит от заданного отношения сигнал/шум. Сигнал на выходе канала с АБГШ представляет собой сумму сигнала на входе и сгенерированной комплексной случайной последовательности.

4. Создание модели канала распространения с частотным сдвигом

Добавьте новый параметр модели, который будет отвечать за частотный сдвиг в канале, назовите параметр *df*. Значение по умолчанию (Default Value) выставите 100. Схема модели канала распространения с частотным сдвигом представлена на рисунке 11.5. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

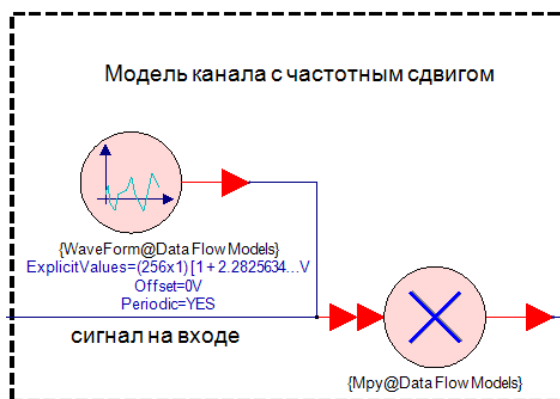


Рисунок 11.5 - Модель канала распространения с частотным сдвигом

Блок *WaveForm* генерирует отсчеты коэффициента сдвига частоты, которые формируются в разделе схемы модели Equations. В параметрах компоненты *WaveForm* в поле *ExplicitValues* укажите переменную *Coeff(:,1)*. Выражение для генерирования вектора коэффициентов частотного сдвига представлено на рисунке 11.6:

```

Ts = 1/Sample_Rate;      % Период одного отсчета
N = 256;                 % Количество поднесущих (2 символа по 128 поднесущих)
dphi = df*2*pi*Ts;      % фазовый сдвиг
for n=1:N
    Coeff(n,1) = exp(1i*(dphi/N)*n); % Расчет коэффициентов
end

```

Рисунок 11.6 - Генерирование коэффициентов сдвига частоты

5. Создание модели приемника

OFDM-приемник в данной работе состоит из нескольких последовательных частей. Первым делом происходит демодуляция OFDM-символов, после чего выполняется функция взаимной корреляции между двумя соседними символами, между которыми вычисляется фазовый сдвиг. Далее происходит вычисление среднеквадратичного отклонения ошибки фазы. На рисунке 11.6 изображена схема модели демодуляции OFDM-символа

и вычисления ВКФ. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

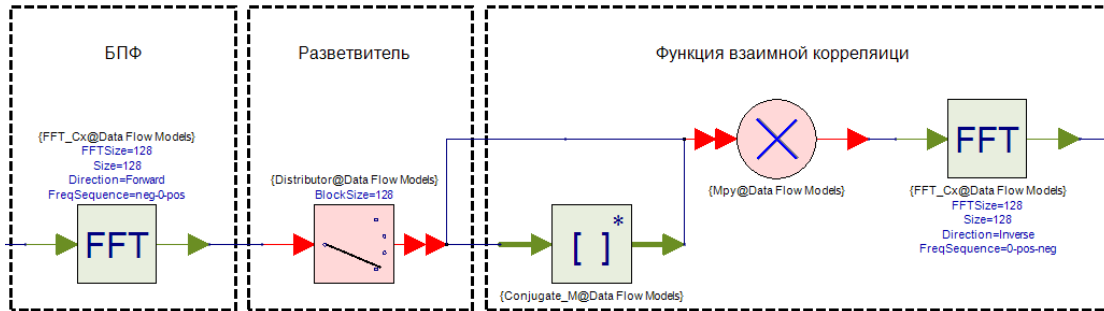


Рисунок 11.6 - Демодуляция и ВКФ OFDM-символа

Операция БПФ выполняется блоком FFT_Cx , который преобразовывает временные отсчеты сигнала в частотные. Блок $Distributor$ выделяет по 128 отсчетов каждого символа из последовательного потока. Функция взаимной корреляции в частотной области вычисляется путем операции ОБПФ от результата перемножения первого OFDM-символа на комплексно-сопряженный второй OFDM-символ.

Схема модели вычисления фазового сдвига представлена на рис. 7. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

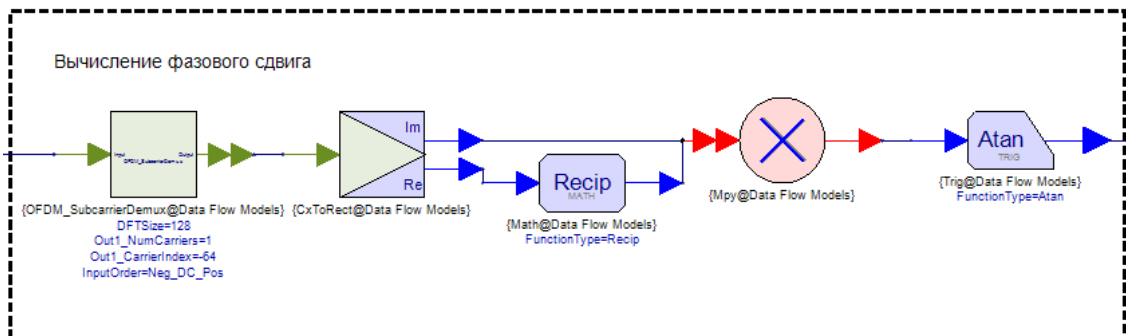


Рисунок 11.7 - Вычисление фазового сдвига

Блок $OFDM_SubcarrierDemux$ выделяет максимальный отсчет функции ВКФ. Схема, представленная на рисунке, реализует выражение:

$$\Delta\hat{\phi} = \arctg \left[\frac{\text{Im}(R(l))}{\text{Re}(R(l))} \right],$$

Схема модели вычисления СКО ошибки фазы представлена на рисунке 11.8. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

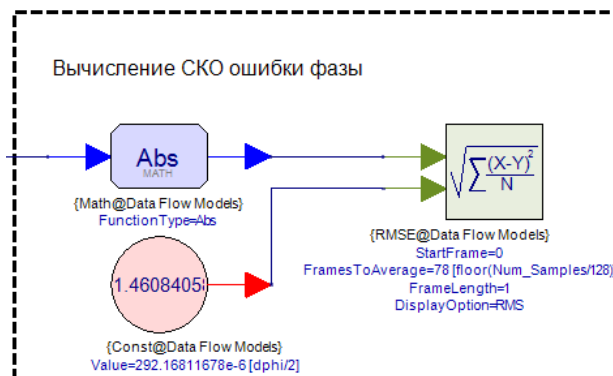


Рисунок 11.8 - Вычисление СКО ошибки фазы

Компонента *RMSE* вычисляет среднее значение СКО ошибки фазы за несколько циклов моделирования. На первый вход поступает оценки ошибки фазы. На второй вход поступает текущее значение ошибки фазы в канале передачи.

6. Расчет зависимости СКО ошибки частоты от отношения сигнал/шум

Получите зависимость СКО ошибки частоты от отношения сигнал/шум в канале распространения. Для этого создайте новый файл проекта – циклическую симуляцию модели Sweep. В качестве изменяемого параметра используется отношение сигнал/шум – параметр модели SNR. Диапазон изменения SNR от 0 до 30 дБ с шагом 1 дБ. Настройки файла Sweep изображены на рисунке 11.9.

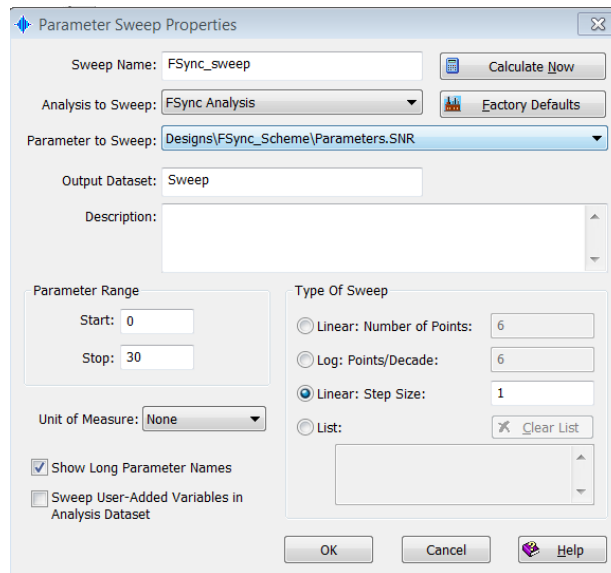


Рисунок 11.9 - Настройки файла Sweep

Результат симуляции сохранится в файле Sweep. Постройте график зависимости СКО ошибки частоты от ОСШ. Так как блок *RMSE* считает СКО ошибки фазы, требуется перевести значение фазы в частоту. Для этого достаточно внести корректировку в поле Custom Equations в параметрах графического окна (рис. 11.10).

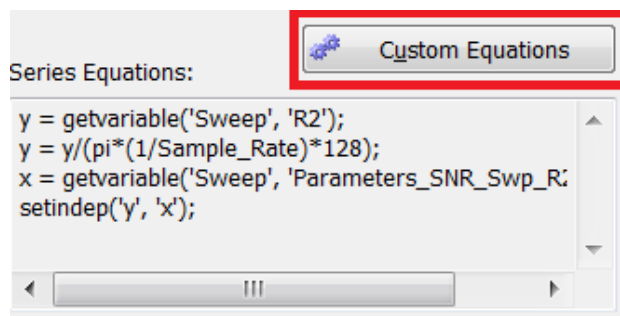


Рисунок 11.10 - Запись выражения перевода фазы в частоту