

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

«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Радиотехнический факультет (РТФ)

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)

Крюков Я.В. Рогожников Е.В. Шибельгут А.А.

Основы построения систем беспроводного широкополосного доступа

Учебно-методическое пособие для лабораторных работ

Основы построения систем беспроводного широкополосного доступа: Учебно–методическое пособие для практических занятий и самостоятельной работы / Я.В. Крюков, Е.В.Рогожников, А.А. Шибельгут ТУСУР.-2015. 37 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов дневной формы обучения. Цель пособия – оказать помощь преподавателям и студентам в вопросах проведения практических занятий и организации самостоятельной работы при изучении дисциплины «Основы построения систем беспроводного широкополосного доступа». Предназначено для студентов радиотехнического факультета, по специальностям 210700 – “Инфокоммуникационные технологии и системы связи”.

© Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	4
Лабораторная работа № 2	20
Лабораторная работа № 3	31
Лабораторная работа № 4	41
Список рекомендуемой литературы.....	49

Лабораторная работа № 1

OFDM Модуляция

Цель работы

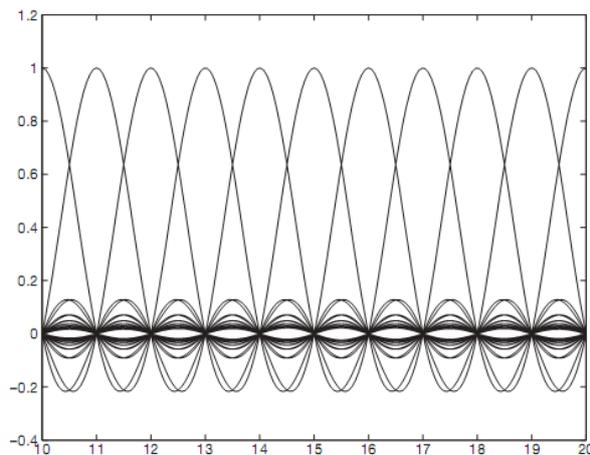
Ознакомиться с технологией OFDM – модуляции, сформировать канал передачи OFDM-символа в системе SystemVue.

Введение

В системах широкополосного беспроводного доступа (ШБД) основным разрушающим фактором для цифрового канала являются помехи от многолучевого приема. Этот вид помех весьма характерен для эфирного приема в городах с разноэтажной застройкой из-за многократных отражений радиосигнала от зданий и других сооружений.

Радикальным решением этой проблемы является применение технологии ортогонального частотного мультиплексирования OFDM, которая специально разработана для борьбы с помехами при многолучевом приеме. OFDM характеризуется сильным перекрытием спектров соседних поднесущих, что позволяет уменьшить в два раза значение частотного разнеса и во столько же раз повысить плотность передачи цифровой информации (бит/с)/Гц.

Для выполнения условий ортогональности необходимо, чтобы частотный разнос между поднесущими был постоянен и равен $\Delta f = 1/T$, где T - длительность информационного символа. При расположении в спектральной плоскости максимума одной поднесущей в одну из точек минимума другой поднесущей, их взаимное влияние будет минимальным.



Перекрытие спектров сигнала с OFDM

Так же условие ортогональности можно проверить, рассчитав корреляционный интеграл:

$$R_{XY} = \int_0^T X(t)Y(t)dt$$

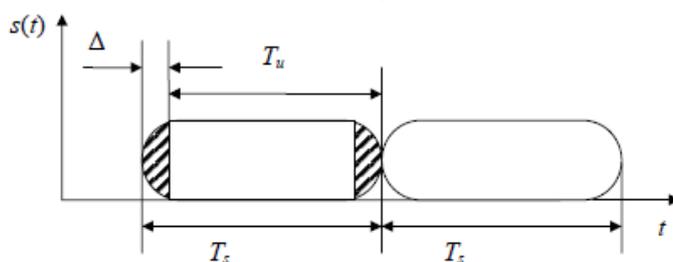
Если функции $X(t)$ и $Y(t)$ ортогональны, то значение коэффициента корреляции $R_{XY} = 0$.

Для формирования OFDMA символа необходимо разбить последовательный входной поток данных на параллельные потоки. Каждая поднесущая модулируется своим потоком по обычной схеме модуляции (например, квадратурная амплитудная модуляция). Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольные искажения (МСИ).

Основной идеей, лежащей в основе борьбы с МСИ, является введение защитного интервала, являющегося частью той длительности, в пределах которой передаются данные. Применительно к рассматриваемому случаю это означает разделение длительности T_s OFDM-символа на полезную часть T_u и защитный интервал Δ . При этом, с одной стороны, в целях малых потерь в скорости передачи информации, желательно, чтобы T_u существенно превосходил Δ (например, на порядок), а с другой — защитный интервал должен быть достаточно протяженным, чтобы противодействовать МСИ.

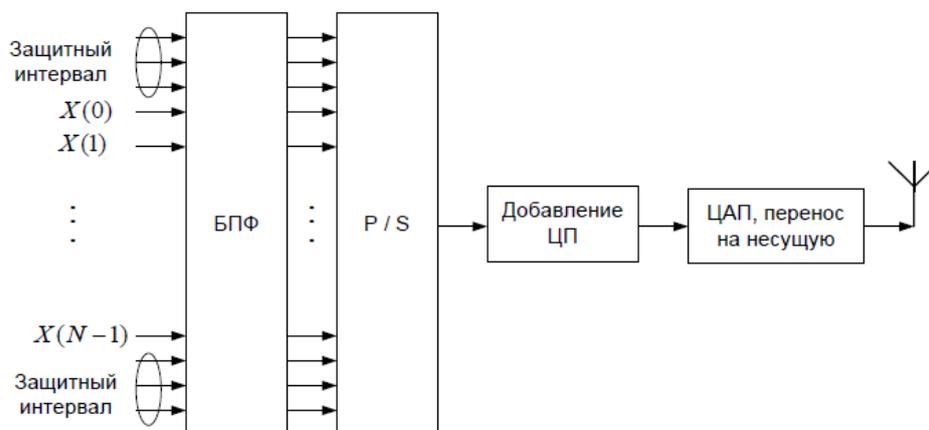
На первый взгляд реализация такой идеи наталкивается на большие сложности ввиду того, что наличие защитного интервала может привести к искажению ортогональности элементарных сигналов. Действительно, если изначально ортогональный частотный разнос составлял $\Delta f = 1/T_s$, то после разделения T_s на T_u и Δ необходимо выбрать $\Delta f = 1/T_u$, и, например, на интервале $[-\Delta; T_s - \Delta]$ соотношение ортогональности перестает выполняться.

Преодоление указанного затруднения основано на том, что часть сигнала, передаваемая на длительности защитного интервала, является циклическим префиксом OFDM-символа т. е. на интервале Δ передается копия части OFDM-символа, взятая “с конца” полезного интервала (на рис. заштрихованы части, соответствующие циклическому префиксу (ЦП) и той части OFDM-символа, из которой этот префикс получен). При этом временное окно анализа составляет T_u , так что анализируется либо непосредственно полезная часть OFDM-символа (при идеальной синхронизации), либо полезная часть OFDM-символа, восстановленная с учетом циклического префикса.



Формирование циклического префикса

Вставка защитного интервала в виде циклического префикса не приводит к потере ортогональности. На рисунке ниже показана структурная схема формирования сигнала с OFDM на основе цифровых устройств с использованием (программно или аппаратно реализованного) блока ОБПФ.



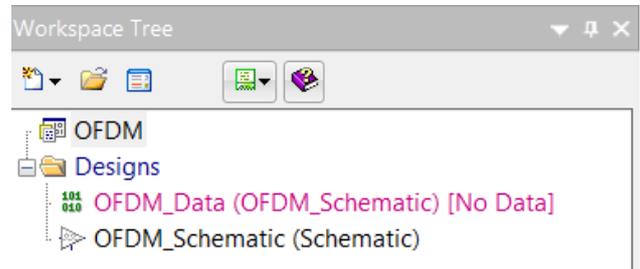
Структурная схема прямого формирования OFDM-сигналов

N комплексных модуляционных символов δ_k (сигнальные отсчеты в частотной области), а также G “пустых” (нулевых) символов, предназначенных для защитных поднесущих, поступают параллельным образом на вход блока ОБПФ, на выходе которого

образуются отсчеты ξ_{ng} ($n = 0, \dots, N - 1$), представляющие собой отсчеты во временной области. После этого в пределах длительности интервала T_s к ним добавляется ещё G отсчетов последовательности $\{\xi_{ng}\}$, образующие циклический префикс.

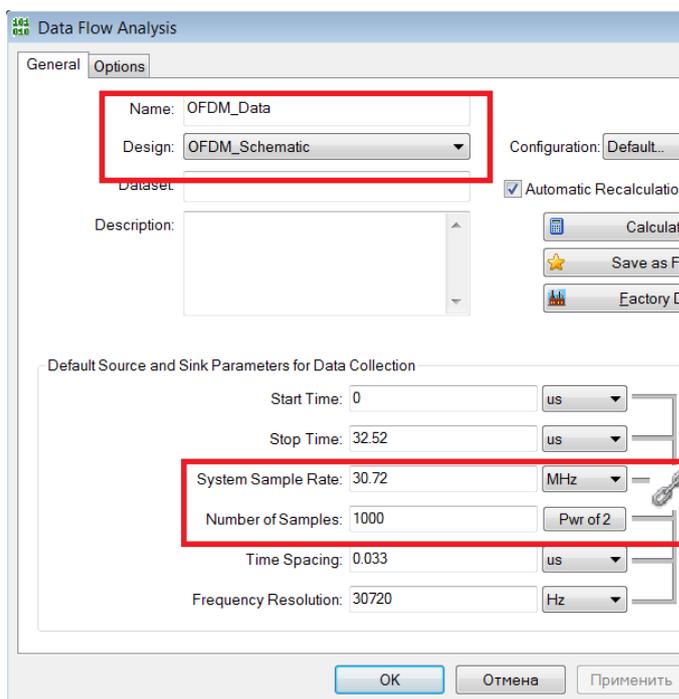
Моделирование канала передачи данных в SystemVue

Приведенная методология работы по созданию модели OFDM в системе SystemVue предполагает первичные знания и опыт работы в программе SystemVue.



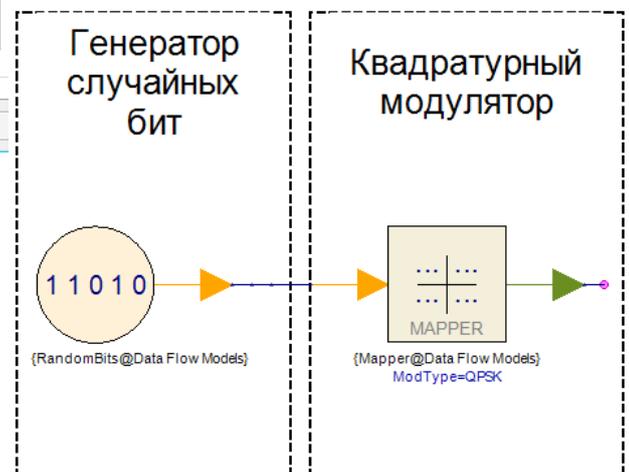
1. Создание проекта и настройка симуляции.

Создайте новый проект, через создание нового рабочего пространства *Blank*. Сохраните проект под именем *OFDM*. Переименуйте файлы, приложенные к проекту: схему – в *OFDM_Scheme*, а файл параметров симуляции – в *OFDM_Data*. В файле *OFDM_Data* настройте параметры симуляции. Задайте значение частоты дискретизации (System Sample Rate) - 30.72 МГц. Количество отсчетов симуляции (Number of Samples) – 1000. Убедитесь, что в качестве схемы выбрана *OFDM_Scheme*.

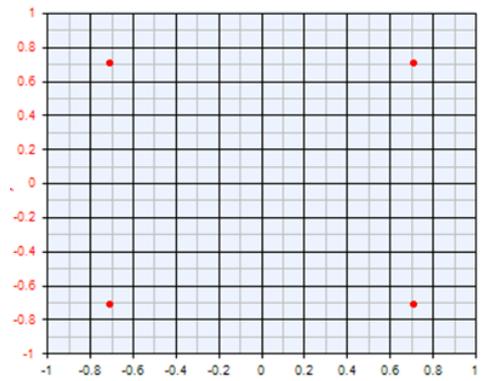


2. Формированию OFDM-символа.

В качестве передаваемого в OFDM-символе сообщения используется случайная последовательность битов, модулированных QAM-4 (QAM-16, QAM-64). Для генерирования случайной последовательности бит используется блок *Bits*. В качестве модулятора используется блок *Mapper*. Найдите эти блоки в библиотеке Algorithm Design

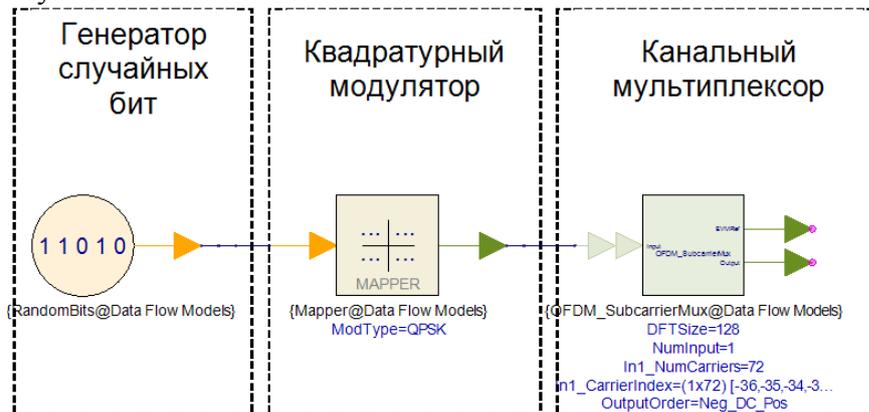


и разместите на схеме, как показано на рисунке.
 Параметры блоков оставьте неизменными.



Убедитесь в правильности формирования сообщения.
 Для этого запишите данные с помощью порта *Sink* на выходе блока *Mapper* и постройте диаграмму созвездия символов. Результат должен соответствовать диаграмме созвездия:

Для расположения поднесущих в частотном домене OFDM-символа используется блок *OFDM_SubcarrierMux*. Найдите блок и библиотеке и добавьте к своей схеме, как показано на рисунке:



Задайте параметры в блоке *OFDM_SubcarrierMux*:

Name	Value
DFTSize	128
NumInput	1
In1_NumCarriers	[72]
In1_DimCarrierIndex	0:1-D
In1_CarrierIndex	[-36:-1,1:36]
OutputOrder	1:Neg_DC_Pos

Размерность ДПФ (DFTSize) - 128 точек. Количество входов (NumInput) – 1 вход, с которого поступает массив поднесущих количеством (In1_NumCarriers) – 72 поднесущие. Адреса размещения поднесущих в частотном домене задаются с помощью одномерного вектора (In1_DimCarrierIndex = 1-D) относительно нулевого индекса (т.е. если DFTSize = 128, то доступные индексы [-63:64], включая 0). В нашем случае все поднесущие размещаются в центре полосы (индексация - [-32:-1,1:32]), пропуская центральную (нулевую) поднесущую. Порядок организации выходного массива (OutputOrder = Neg_DC_Pos) означает, что выходной массив данных формируется в порядке: отрицательные индексы, центральная несущая, положительные индексы. Неиспользуемые боковые поднесущие (28 слева и 28 справа) служат в качестве защитного

частотного интервала. Запишите спектральные отсчеты на выходе (Output) мультиплексора с помощью порта Sink и постройте график. В параметрах порта укажите запись отсчетов от 0 до 127:

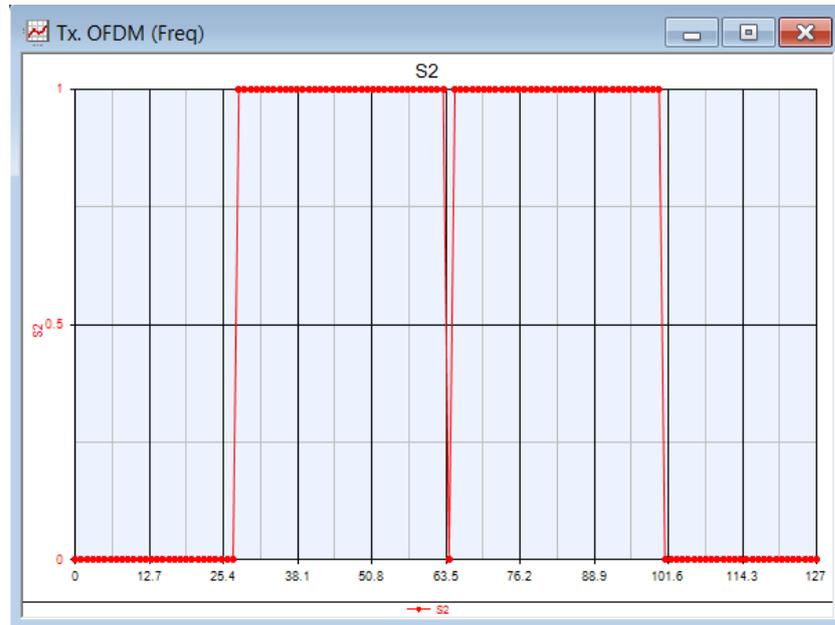
Data Collection

Automatic (Prefer Time, then Samples)

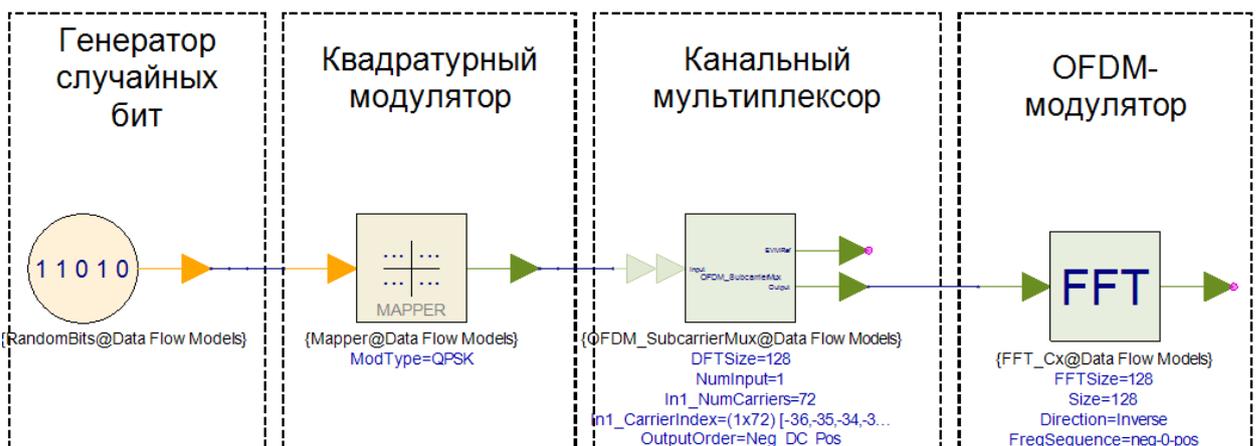
Samples From: 0 To: 127

Time From: Start_Time s To: Stop_Time s

Отображение спектральных отсчетов должен соответствовать рис. С.



Сформированные спектральные отсчеты OFDM-символ трансформируются во временные с помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ). Для этого найдите блок *FFT_Cx* и добавьте его последовательно на схему:

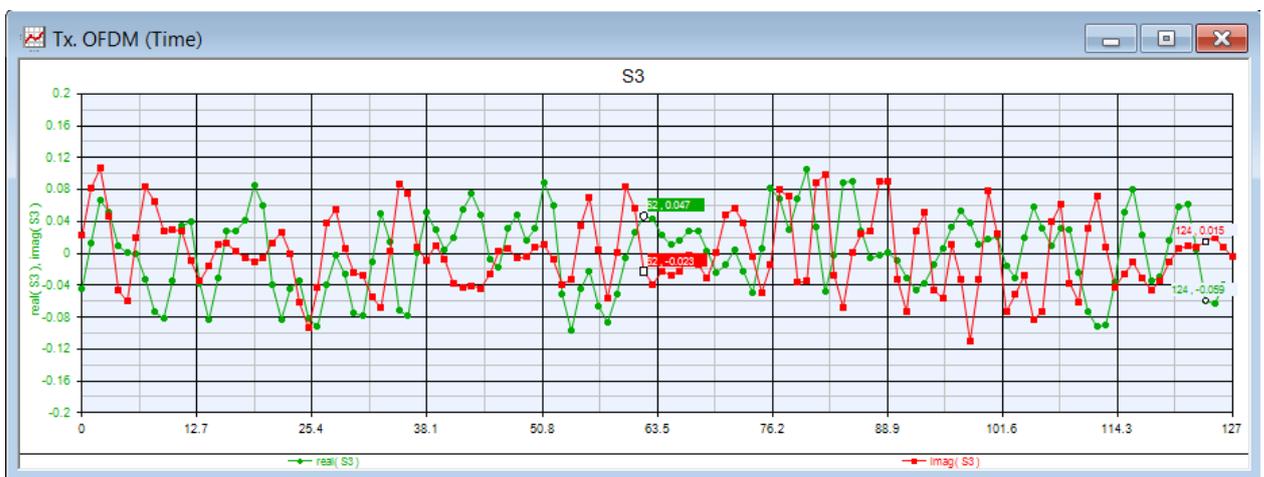


Задайте параметры в блоке *FFT_Cx*:

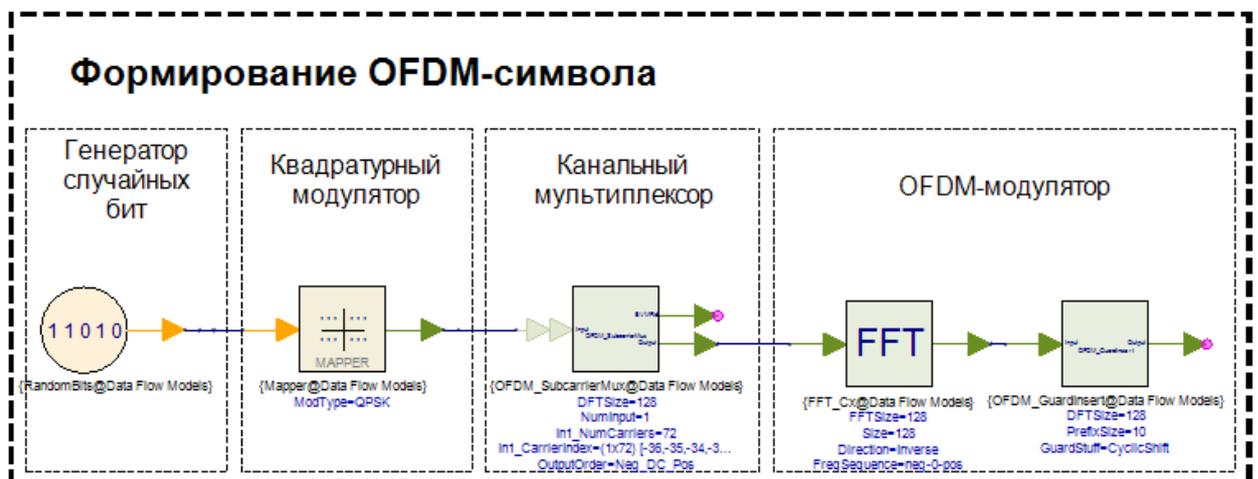
Name	Value
FFTSize	128
Size	128
Direction	0:Inverse
FreqSequence	1:neg-0-pos

Размерность ДПФ (FFTSize) – 128 точек, выбирается исходя из размерности ДПФ в мультиплексе. Размер массива входящих данных для обработки (Size) – 128. Направление преобразования Фурье (Direction) – обратное (inverse). Порядок организации входного массива частот (FreqSequence) выбирается исходя их параметра Output order в предыдущем блоке – отрицательная, центральная, положительная (neg-0-pos).

На выходе ОДПФ мы можем наблюдать временную форму комплексного сигнала. Получите подобный график у себя в модели:



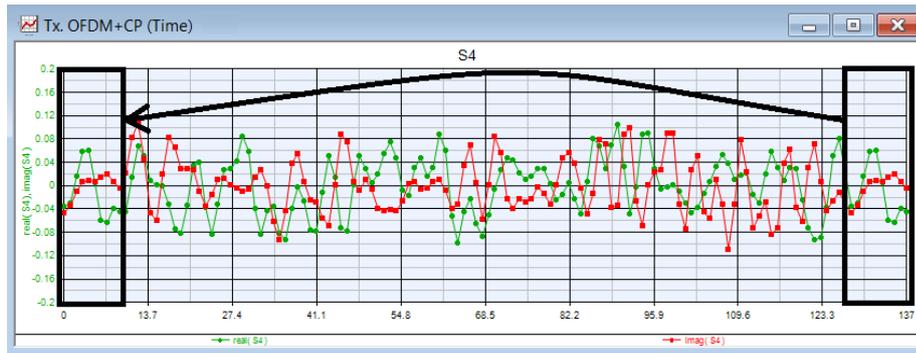
Последним шагом формирования OFDM-символа является добавление циклического префикса (ЦП), который служит для устранения межсимвольной интерференции (МСИ). Циклический префикс является копией конца символа, вставленной в его начало. Найдите в библиотеке блок *OFDM_GuardInsert* и поместите его последовательно в схему:



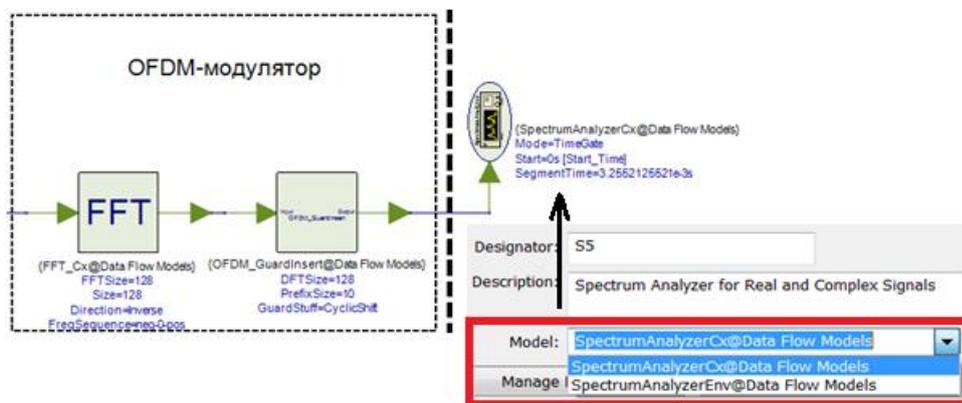
В параметрах блока *OFDM_GuardInsert* укажите размерность ОДПФ (DFTSize) – 128 точек и размер ЦП (PrefixSize) – 10 точек. Постфикс в формируемом OFDM-символе отсутствует (PostFixSize = 0) и тип префикса (GuardStuff) – циклический (CyclicShift):

Name	Value
DFTSize	128
PrefixSize	[10]
PostfixSize	[0]
GuardStuff	0:CyclicShift
OversampleRatio	0:x1

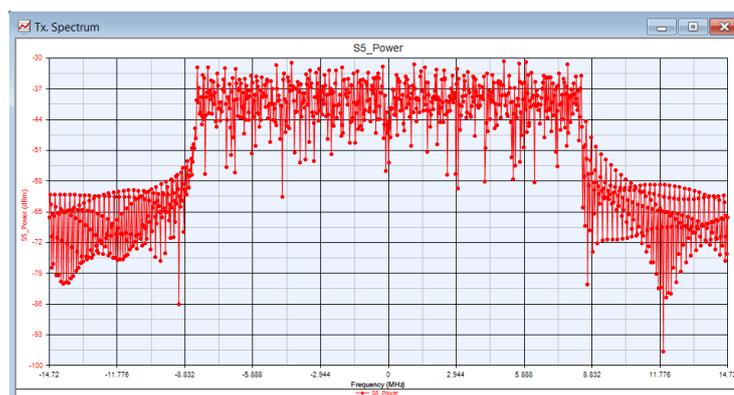
Отобразите 138 отсчетов сформированного OFDM-символа. Убедитесь, что 10 отсчетов с конца скопировано в начало символа:



Спектр OFDM-символа на выходе формирователя можно наблюдать с помощью блока *SpectrumAnalyzer*. В параметрах блока выставите Model: *SpectrumAnalyzerCx*. Это требуется для того, спектроанализатор работал с комплексным сигналом:

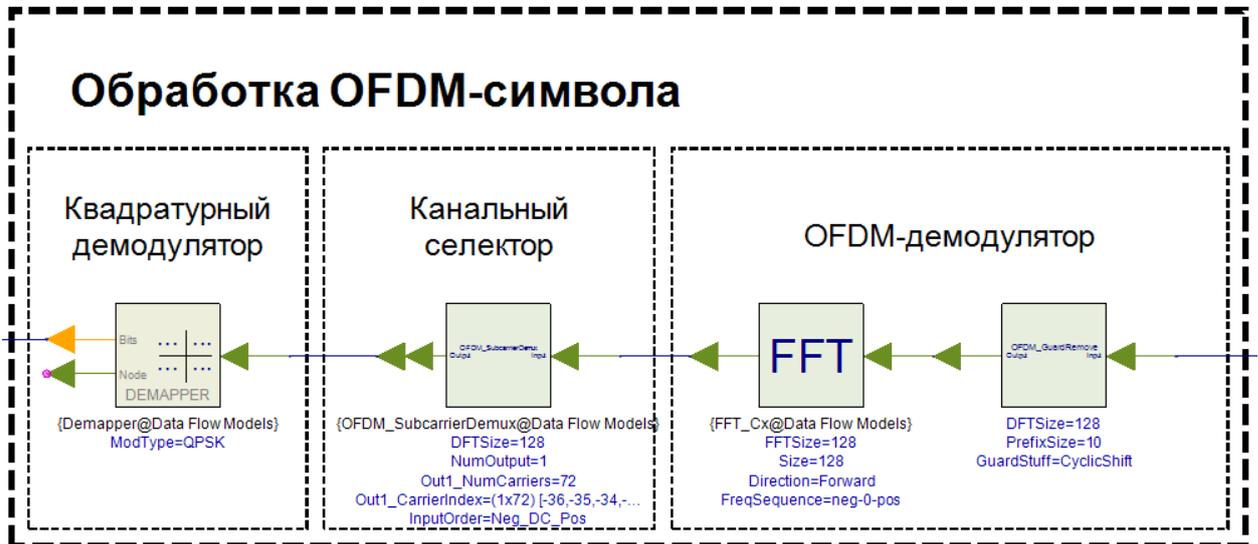


Постройте спектр OFDM-символа и проанализируйте. Определите полосу сигнала, обоснуйте и убедитесь в провале на нулевой частоте.

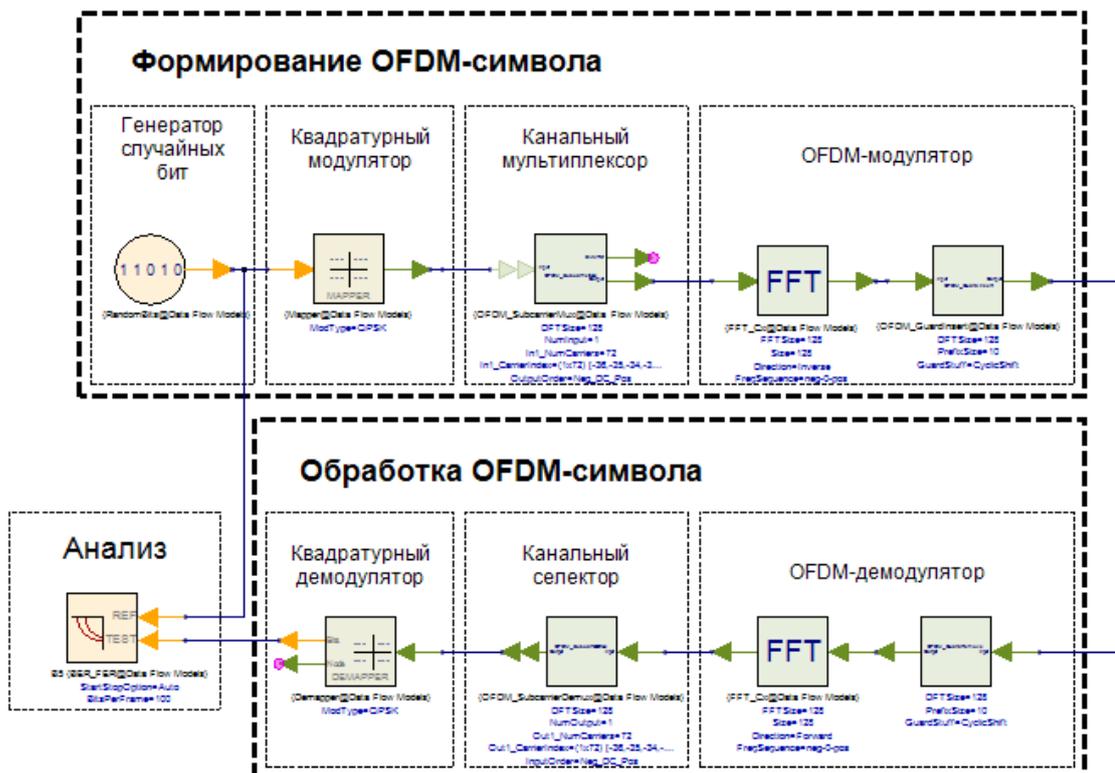


3. Обработка OFDM-символа.

После процедуры добавления циклического префикса, OFDM-символ можно считать сформированным. Далее следует собрать схему OFDM приемника, которая является обратной схеме OFDM-формирователя. Схема, параметры и названия блоков указаны на рисунке:



Для проверки работоспособности модели требуется сравнить переданное и полученное сообщение и определить количество ошибочно демодулированных бит (Анализ). Для этого добавьте блок *BER_FER*, который вычисляет вероятность битовых ошибок. На вход *REF* должны поступать данные со случайного генератора бит в передатчике, а на вход *TEST* данные с демодулятора приемника. Полная схема модели изображена на рисунке ниже:



В параметрах блока *BER_FER* укажите работу с отсчетами: StartStopOption – Samples:

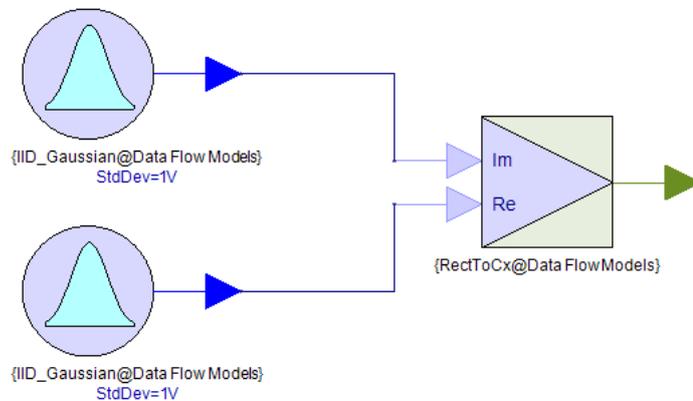
Name	Value
StartStopOption	0:Auto
SampleStart	0:Auto
SampleStop	1:Samples
SampleDelayBound	2:Time
TimeStart	Start Time

Убедитесь, что битовые ошибки отсутствуют. Для этого в файле *OFDM_Data_OFDM_Scheme_Data* посмотрите значение *B2_BER*. Если *B2_BER* = 0, значит битовых ошибок за период симуляции не произошло.

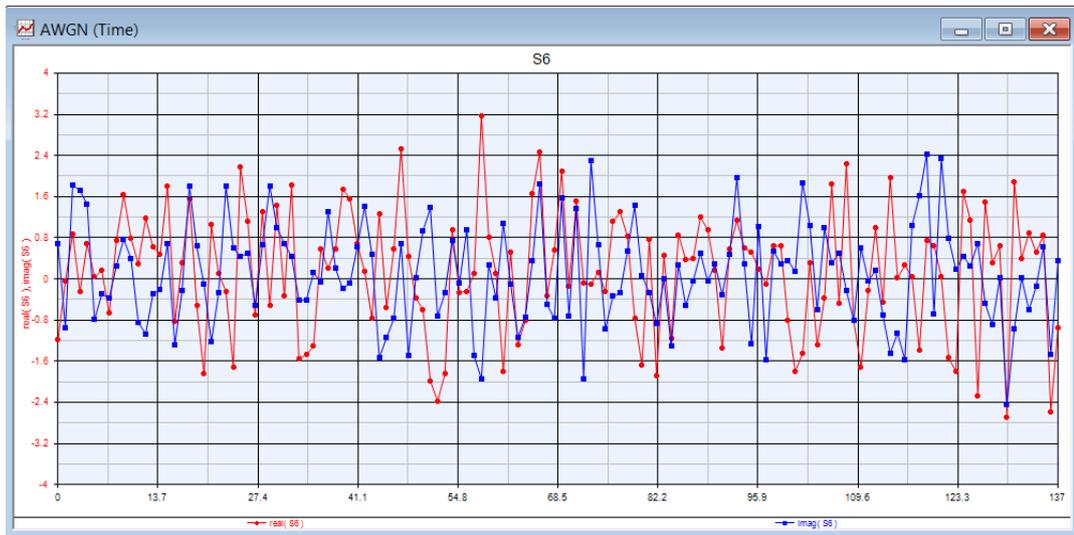
Variable	B2_BER_In...	B2_BER
B2_BER	0	0
B2_BER_Index		
B2_FER		
B2_FER_Index		

4. Создание модели канала РРВ с АБГШ

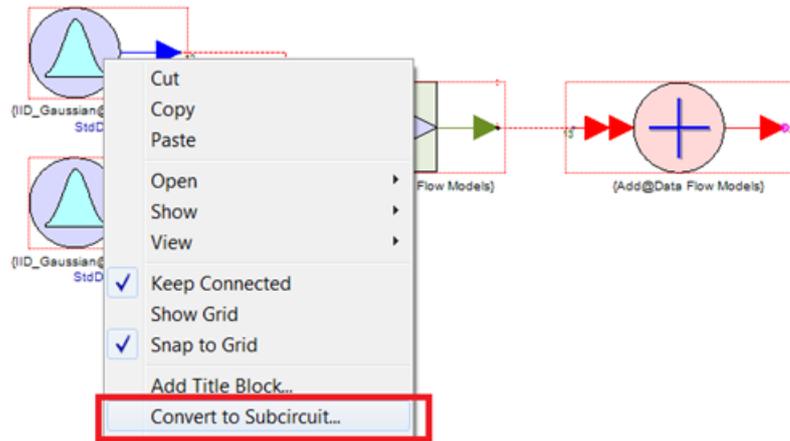
К созданной модели OFDM-системы добавим канал распространения радиоволн, который содержит только аддитивный белый гауссов шум (АБГШ). Генератор комплексного АБГШ реализуем по схеме, представленной на рисунке ниже:



В используемой схеме два независимых генератора шума *IID_Gaussian* генерируют АБГШ, который с помощью блока *RectToCx* преобразуется в комплексный АБГШ. Постройте график 139-ти отсчетов комплексного АБГШ:

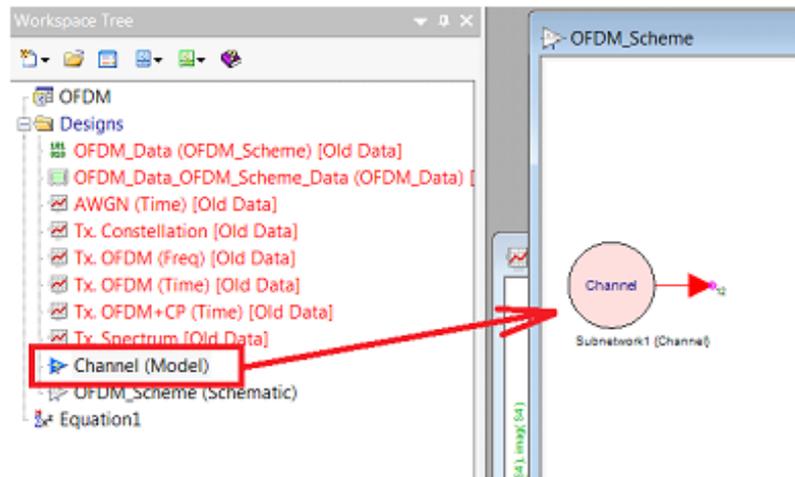


Для упрощения работы со схемой, объединим генератор комплексного АБГШ в одну подсистему, добавив последовательно блок суммирования Add. Для объединения в подсистему нужно выделить нужные блоки и выбрать **ConvertToSubcircuit** из контекстного меню:



Сохраните подсистему под названием Channel.

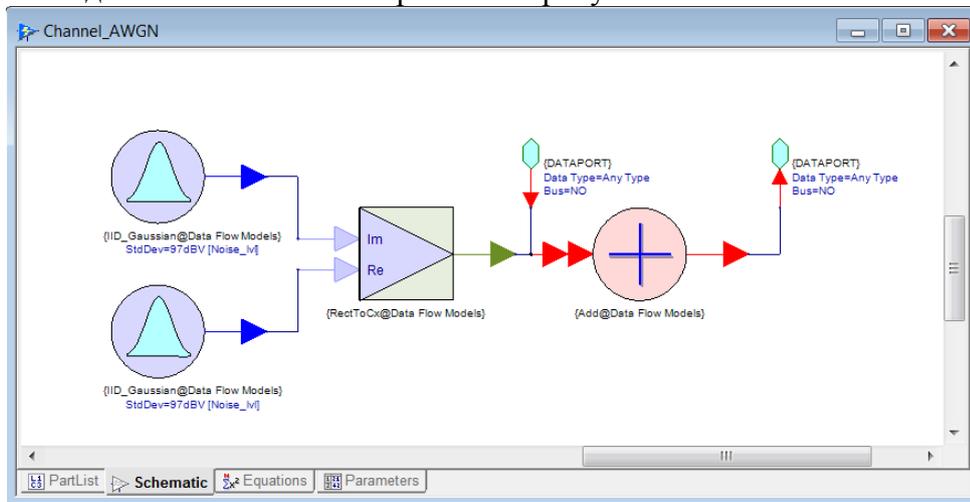
Созданная подсистема хранится в папке с файлами проекта. Чтобы использовать подсистему, перетащите ее мышкой из поля файлов на схему.



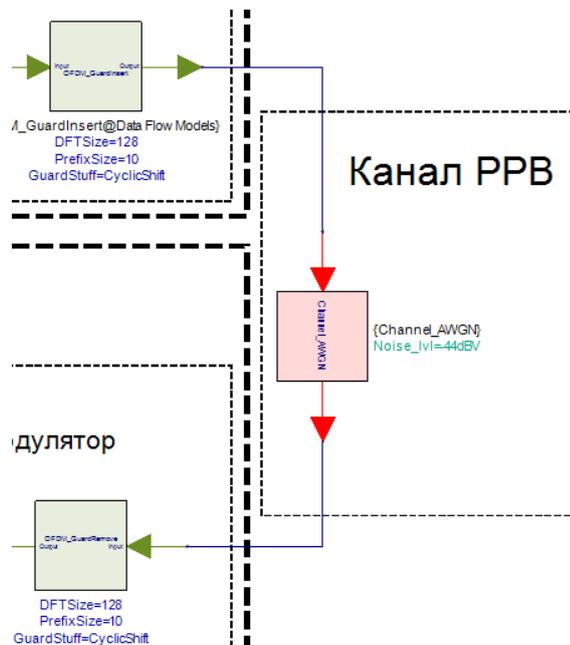
Чтобы добавить входной порт для OFDM-сигнала, отредактируем подсистему. Для этого нужно открыть ее из поля файлов проекта. В открывшемся окне можно увидеть, что у подсистемы один выходной порт (Dataport). Чтобы добавить входной порт, можно скопировать выходной порт и выставить параметр направления (Direction) – вход (Input).

Name	Value
PORT	2
Direction	0:Input
Data Type	1:Any Type

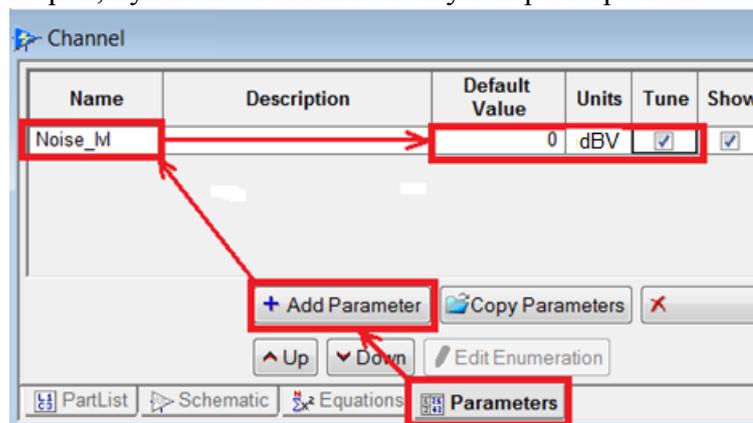
Соедините выход порта с входом сумматора. Таким образом, отсчеты комплексного АБГШ будут суммироваться с отсчетами входящего сигнала, образуя смесь сигнала и шума. Схема подсистемы AWGN изображена на рисунке:



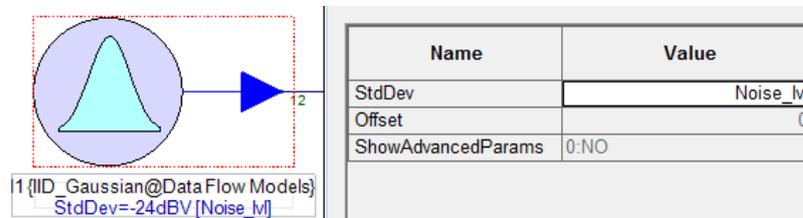
Теперь добавьте на схему отредактированную подсистему AWGN и вставьте ее в схему между блоками добавления и удаления циклического префикса (рис. С.)



Создайте параметр, отвечающий за уровень мощности генерируемого шума. Для этого в подсистеме Channel нужно зайти во вкладку параметров и создать новый параметр Noise_lvl, единицей измерения (Units) выбрать вольт (Valtage -> dBV) и задать стандартное значение (Default Value) – 0. Чтобы параметр наблюдался в окне быстро изменяемых параметров, нужно поставить галочку в параметре Tune.



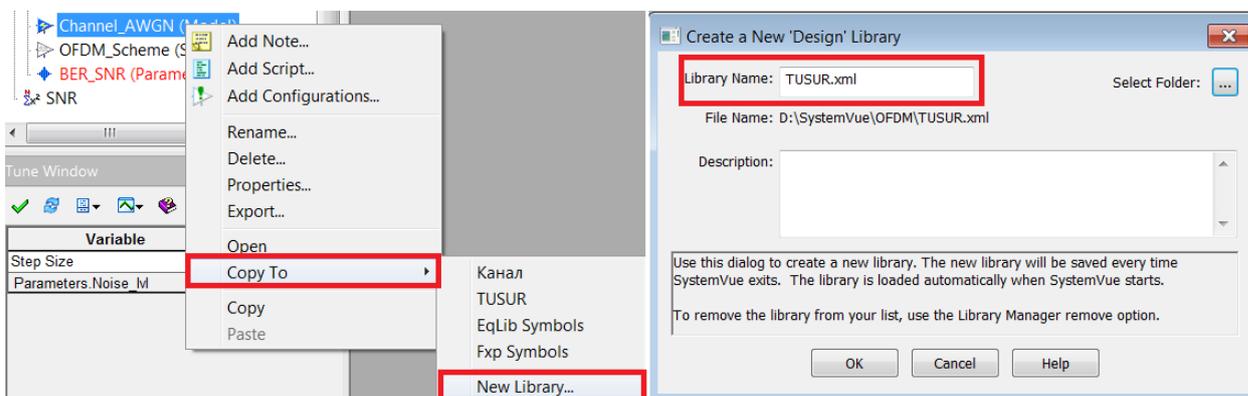
В обоих генераторах шума в качестве параметра отклонения уровня шума укажите Noise_lvl.



В результате вы создали свой блок, который генерирует отсчеты АБГШ и суммирует его с отсчетами OFDM-символа. Уровень АБГШ в дБмВ управляется из окна изменения параметров Tune Window. Шаг, с которым будет изменяться параметр – Step Size, может достигать любых значений и устанавливается пользователем.

Variable	Value
Step Size	1
Parameters.Noise_M	0

Созданный блок генерирования АБГШ понадобится в будущих лабораторных работах, сохраните его в новую библиотеку TUSUR:



5. Анализ данных

5.1 Расчет ОСШ на входе демодулятора

Для расчета отношения сигнал/шум (ОСШ) требуется сравнить среднюю мощность символов в приемнике и передатчике. Переданные символы записываются с выхода модулятора *Mapper* в передатчике. Принятые символы - с выхода канального селектора *OFDM_SubcarrierDemux* с помощью порта *Sink* (порт назовите *Symbol_Rx*). Чтобы записать выражение для расчета ОСШ нужно воспользоваться окном для записи уравнений **Equation**. В этом окне пользователь может производить произвольные расчеты с помощью элементарных выражений и функций. Откройте файл *Equation1*, переименуйте его в *SNR* и запишите код, приведенный на рисунке ниже:

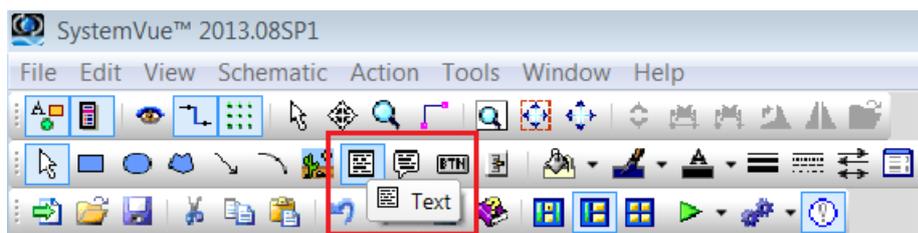
```

2 using('OFDM_Data_OFDM_Scheme_Data'); % Обращение к данным файла
3 L = length(S1); % Длина сигнала
4 Power_Tx = sum(abs(S1).^2)/L; % Средняя мощность переданных символов
5 Power_Rx = sum(abs(Symbol_Rx).^2)/L; % Средняя Мощность принятых символов
6
7 SNR = 10*log10(Power_Tx/(Power_Rx - Power_Tx)); % Расчет ОСШ
8 SNR = round(SNR); % Округление
9
10 setvariable('OFDM_Data_OFDM_Scheme_Data','SNR',SNR); % Запись переменной SNR в файл данных

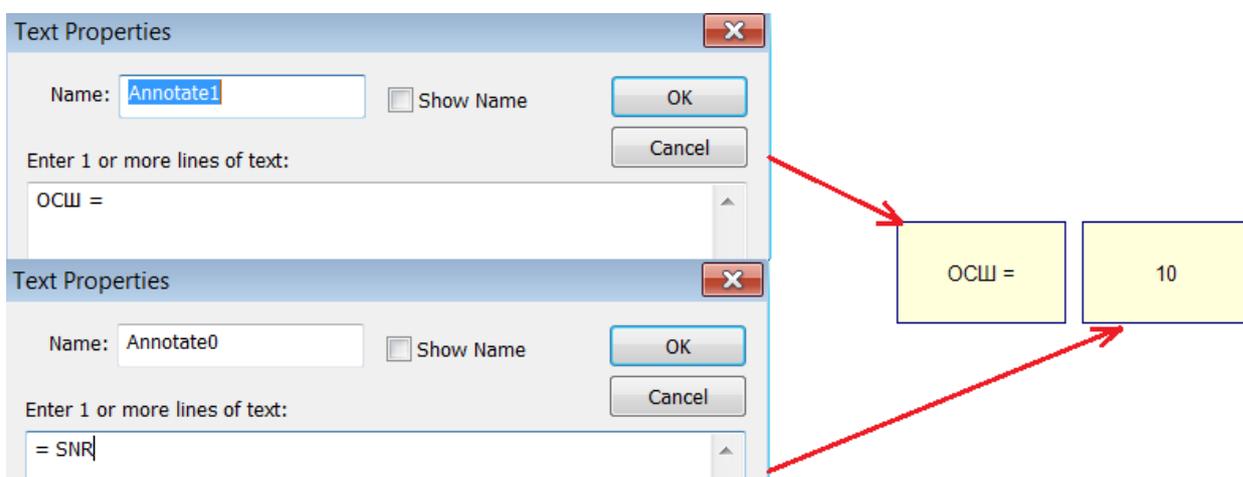
```

Данный код реализует обращение к файлу, в котором хранятся все записанные сигнальные отсчеты. Далее производится расчет средней мощности переданных и принятых символов, после чего определяется ОСШ. Файл *SNR* пересчитывается заново

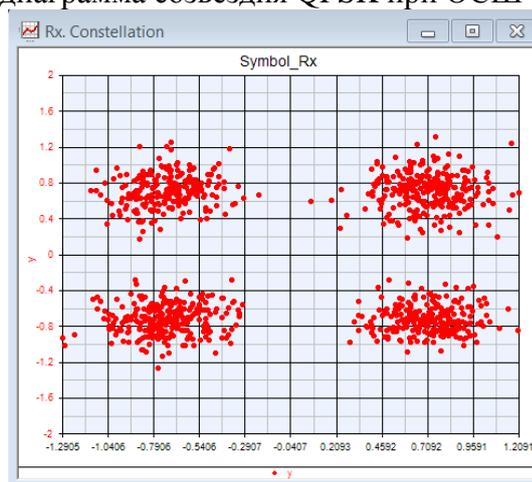
при каждом запуске симуляции. Для вывода результатов расчета на экран воспользуйтесь инструментом Text в окне инструментов:



Добавьте два текстовых элемента на схему в удобное для вас место. В первое текстовое окно введите ОСШ = (обычный текст), в другое окно введите = SNR (вывод переменной из уравнения). С помощью текста можно делать пометки, пояснения к схеме или отображать те или иные переменные.

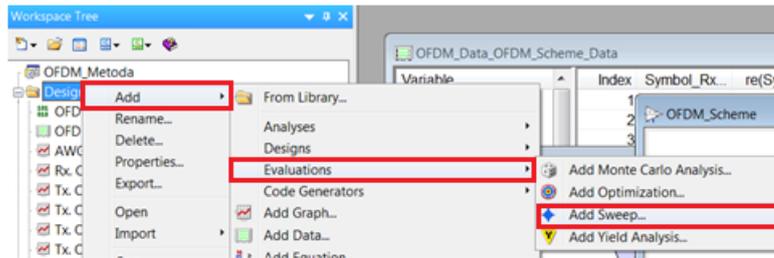


Изменяя уровень АБГШ в канале, вы сможете наблюдать изменение ОСШ. Постройте диаграмму созвездия перед входом в демодулятор приемника при параметре Noise_lvl = -36. Такой вид принимает диаграмма созвездия QPSK при ОСШ = 11 дБ.

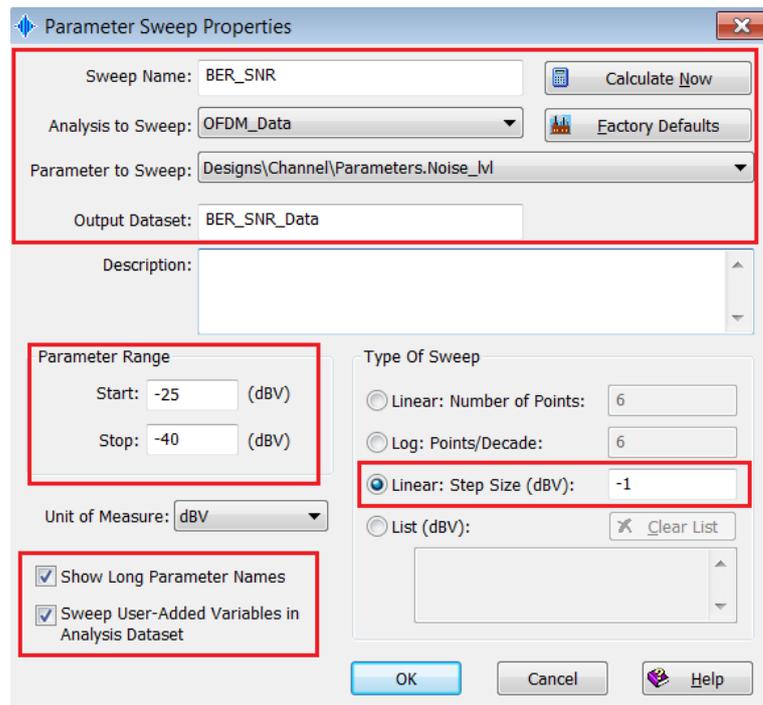


5.2 Циклическая симуляция. Зависимость битовых ошибок от ОСШ.

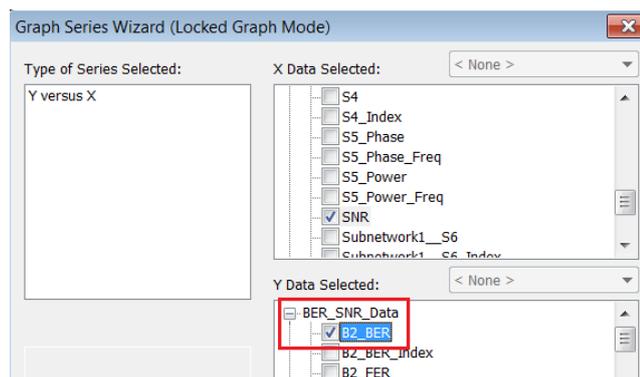
Получим зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ. Для этого нужно создать циклическую симуляцию (**sweep**) с изменяемым параметром уровня шума.



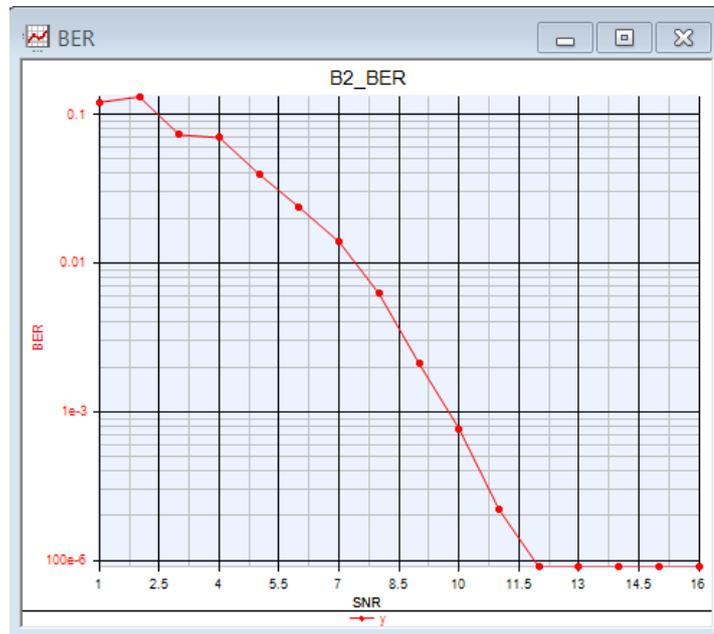
Назовите файл *BER_SNR*. В параметрах обратите внимание на диапазон и шаг изменения параметра. Так же убедитесь, что в качестве анализируемой схемы выбрана ваша схема. В поле Output Dataset стоит указать файл, в который сохраняться результат симуляции. При нажатии кнопки расчета (Calculate Now) будет произведено 15 симуляций с изменением параметра уровня шума от -25 до -40 дБВ с шагом -1 дБВ. Результат будет записан в файл *BER_SNR_Data*.



Для расчета вероятности битовых ошибок требуется большое количество отсчетов за период симуляции. В файле параметров симуляции выставите количество отсчетов за симуляцию (Number of Sample) – 100.000, после чего произведите расчет в Sweep. В результате сгенерируется файл с данными *BER_SNR_Data* в папке проекта. Нас интересует переменная вероятности битовой ошибки (*B2_BER*) и ОСИШ (*SNR*). Постройте зависимости *B2_BER* (ось Y) и *SNR* (ось X). Удостоверьтесь что в обоих случаях вы выбираете переменные из файла *BER_SNR_Data*.



Подпишите оси: SNR (ось X) и BER (ось Y), так же выставите логарифмический масштаб по оси Y и постройте график (назовите BER). Пример представлен на рисунке:



Лабораторное задание

Получите графики зависимости BER для нескольких типов квадратурной модуляции (QAM-16, QAM-64, APSK), изменяя параметр модуляции в модуляторе/демодуляторе. В отчет приведите схему проекта, графики, полученные в ходе работы, графики BER для трех видов модуляции (на выбор). Рассчитайте количество бит, содержащихся в одном OFDM-символе для всех типов модуляции.

Лабораторная работа № 2

Метод множественного доступа с частотным разделением каналов 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 не прямой видимости, что весьма существенно для мобильных пользователей.

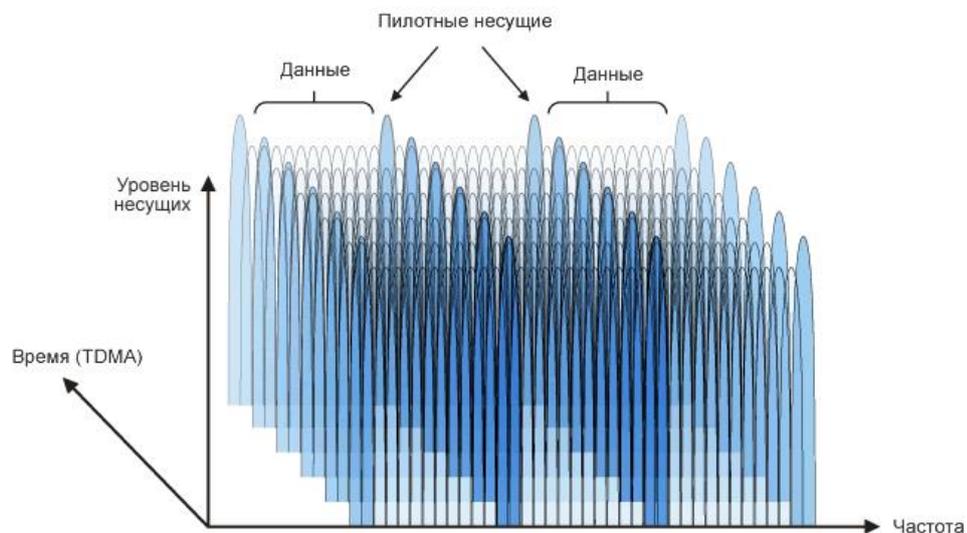


Рис. 1 – Доступ к частотно-временному ресурсу в OFDMA

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 в любом законе, в том числе по псевдослучайному (рис. 2).

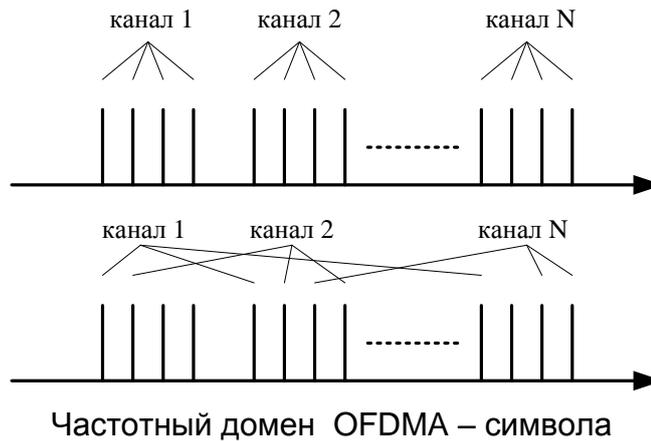


Рис. 2 - Пример расположения каналов в частотном домене OFDM-символа

Моделирование OFDMA в SystemVue

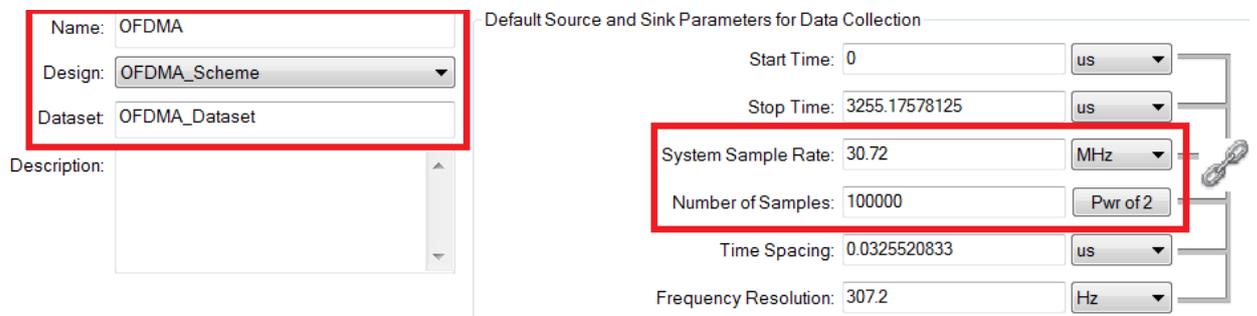
Приведенная методология работы по созданию модели OFDMA в системе SystemVue предполагает выполнение предыдущей работы по OFDM.

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:

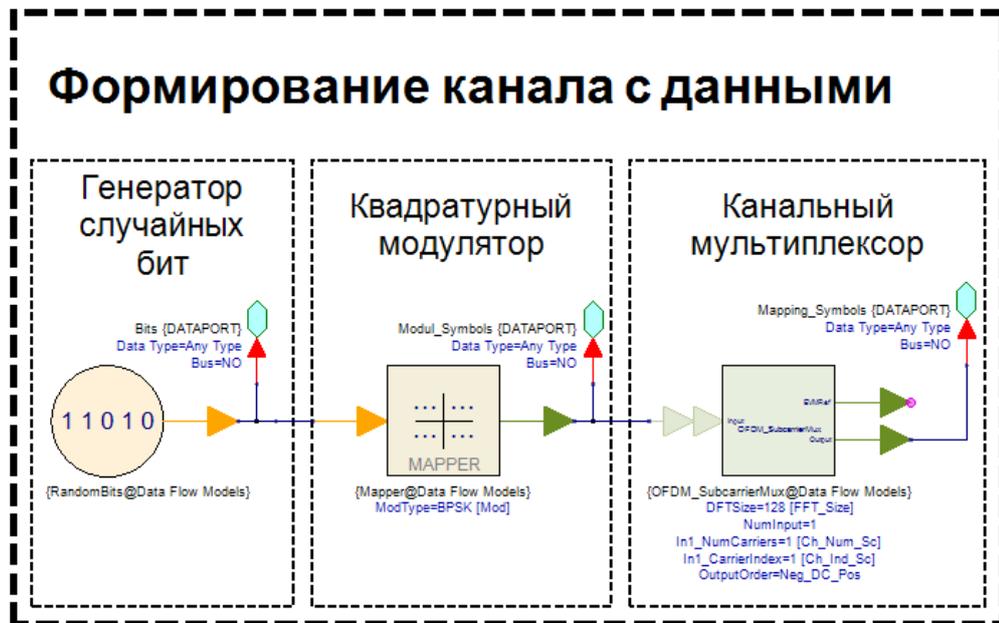


В файле OFDMA настройте параметры симуляции. Задайте значение частоты дискретизации (System Sample Rate) - 30.72 МГц. Количество отсчетов симуляции (Number of Samples) – 100000. Убедитесь, что в качестве схемы выбрана OFDMA_Scheme, а в качестве файла с результатами симуляции – OFDMA_Dataset.

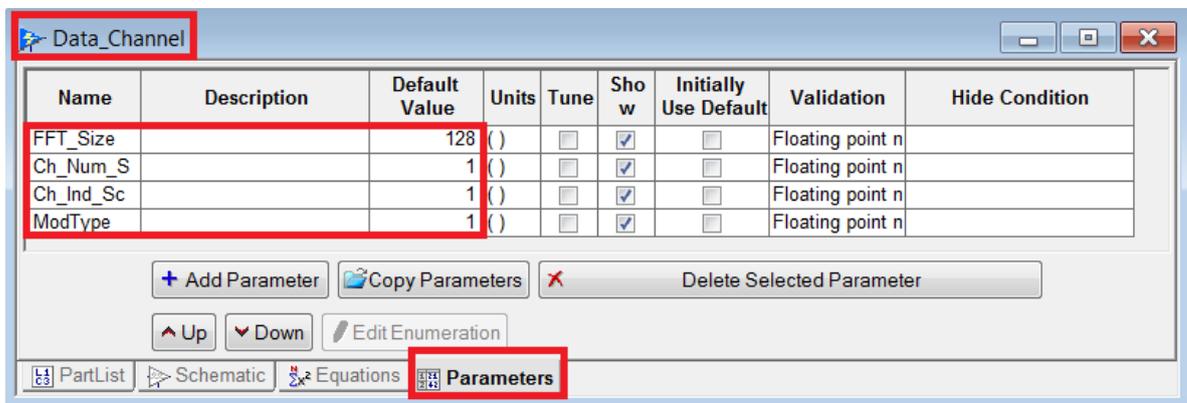


2. Создание подсистемы формирования канала данных

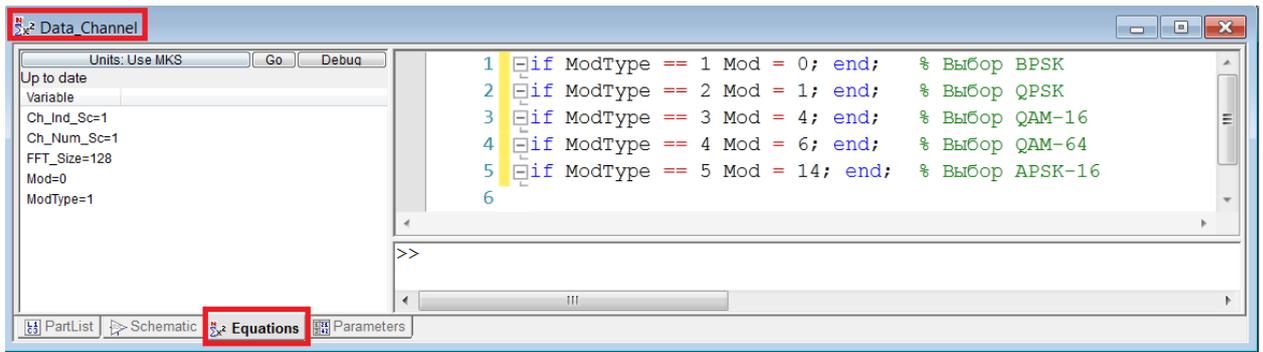
Создайте подсистему формирования OFDMA канала. В качестве передаваемого в канале сообщения используется случайная последовательность бит. Назовите подсистему Data_Channel. Схема внутри подсистемы выглядит следующим образом:



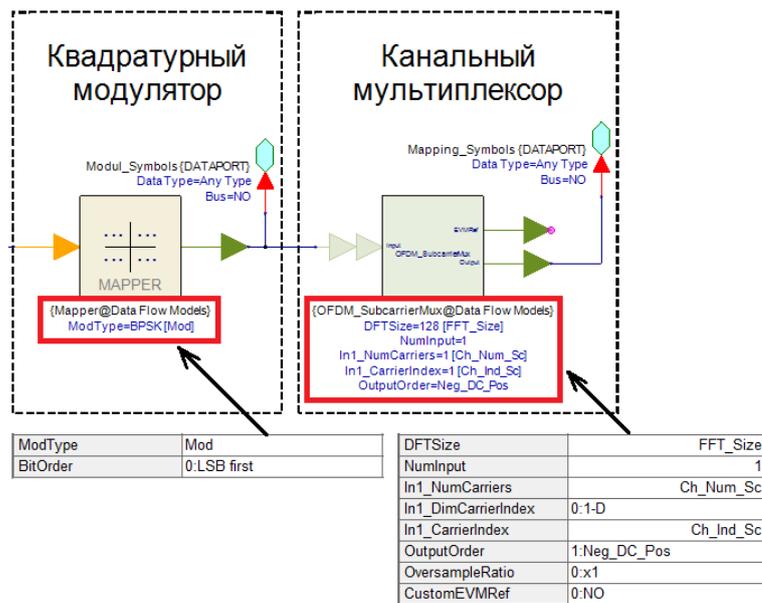
С выхода **Bits** - немодулированные биты, которые будут использоваться в качестве опорных для оценки вероятности битовой ошибки. С выхода **OFDMA_Symbols** – модулированные и расставленные в частотном домене символы квадратурной модуляции. В качестве используемых параметров подсистемы – параметры модуляции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



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:



Задайте значение созданных параметров в блоках на схеме, как показано на рисунке ниже:

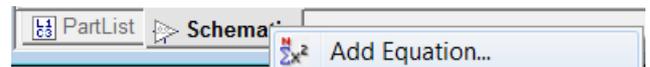


3. Формирование OFDMA-символа

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 ниже:

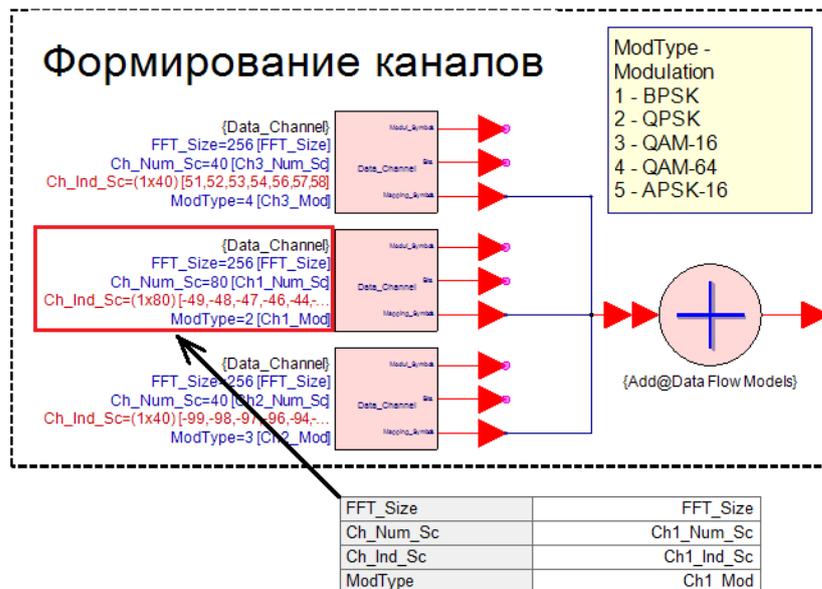


```

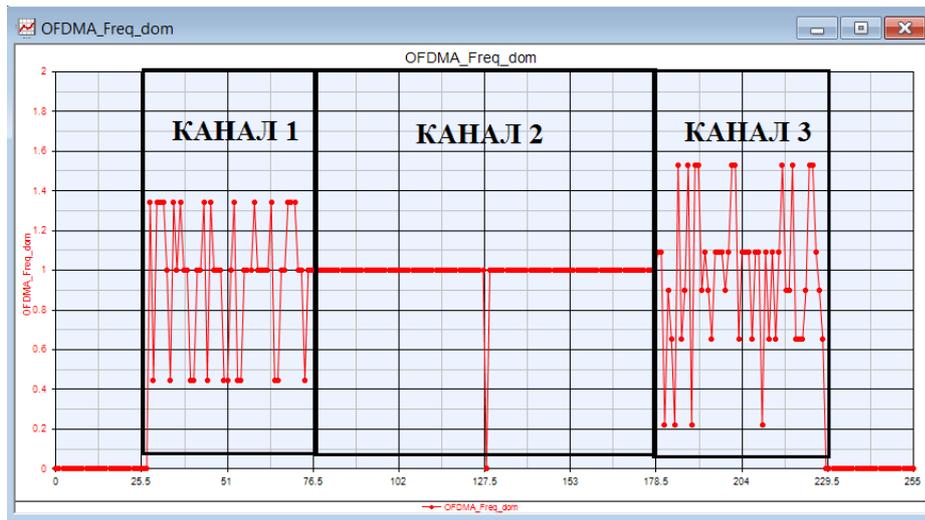
OFDMA_Scheme
Units: Use MKS
Go Debug
Up to date
Variable
Ch1_Ind_Sc = Real [1x100]
Ch1_Mod=2
Ch1_Num_Sc=100
Ch2_Ind_Sc = Real [1x50]
Ch2_Mod=3
Ch2_Num_Sc=50
Ch3_Ind_Sc = Real [1x50]
Ch3_Mod=4
Ch3_Num_Sc=50
CP_Size=16
FFT_Size=256
1
2 FFT_Size = 256; % Размерность FFT в системе
3 CP_Size = 16; % Размер 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)

```

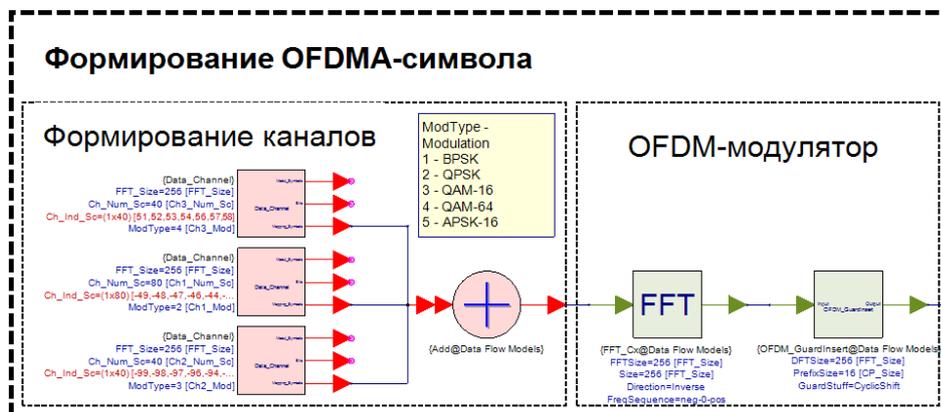
Разместите параллельно на схеме OFDMA_Scheme 3-и канала данных, указав соответствующие параметры для каждого канала. Соедините выход **OFDMA_Symbols** каждого канала со входом сумматора, таким образом вы складываете в частотном домене спектральные отсчеты каждого канала. Запишите результаты симуляции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



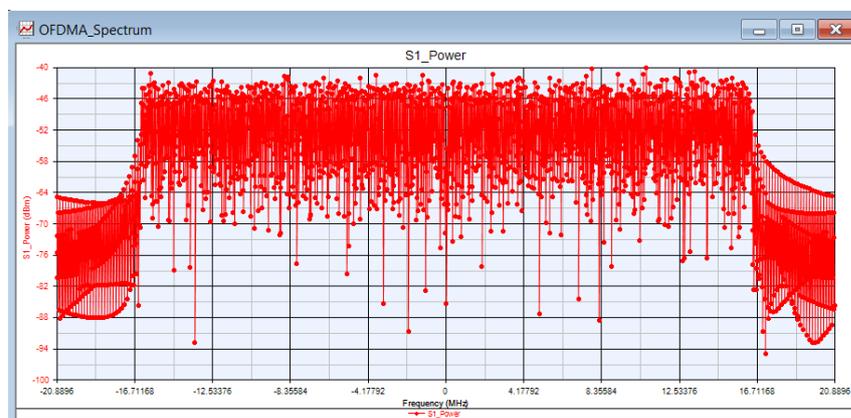
Частотный домен OFDMA-символа является результатом канального мультиплексирования, в следствии которого каждый канал располагается в предназначенном ему участке спектра:



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

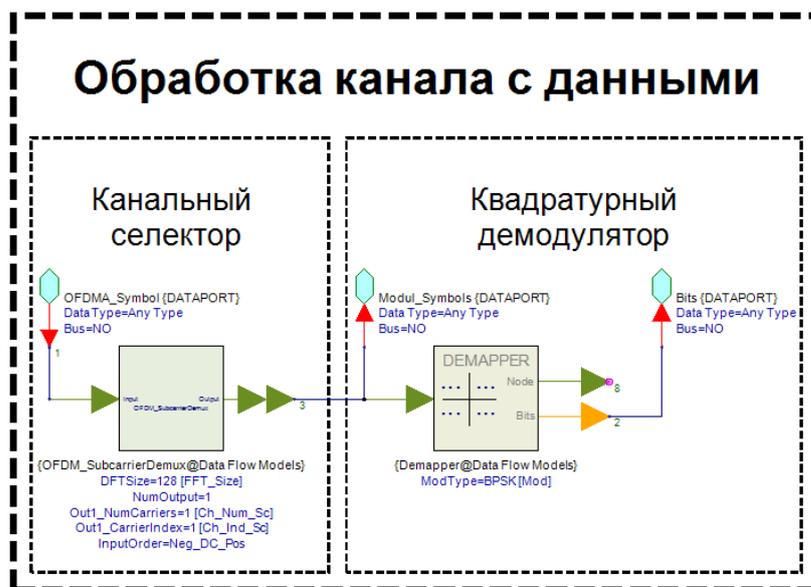


Постройте спектр OFDMA-символа после операции добавления циклического префикса:

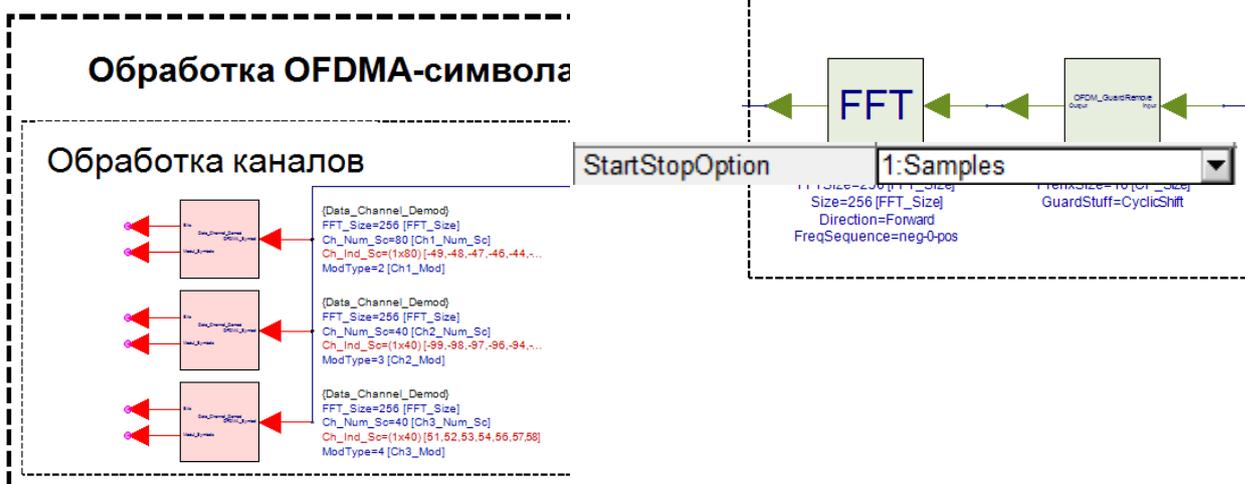


4. Обработка OFDMA-символа

Соберите схему OFDMA-демодулятора, которая является обратной схеме OFDMA-модулятора. После операции БПФ в приемнике каждый канал селективируется 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 ниже:

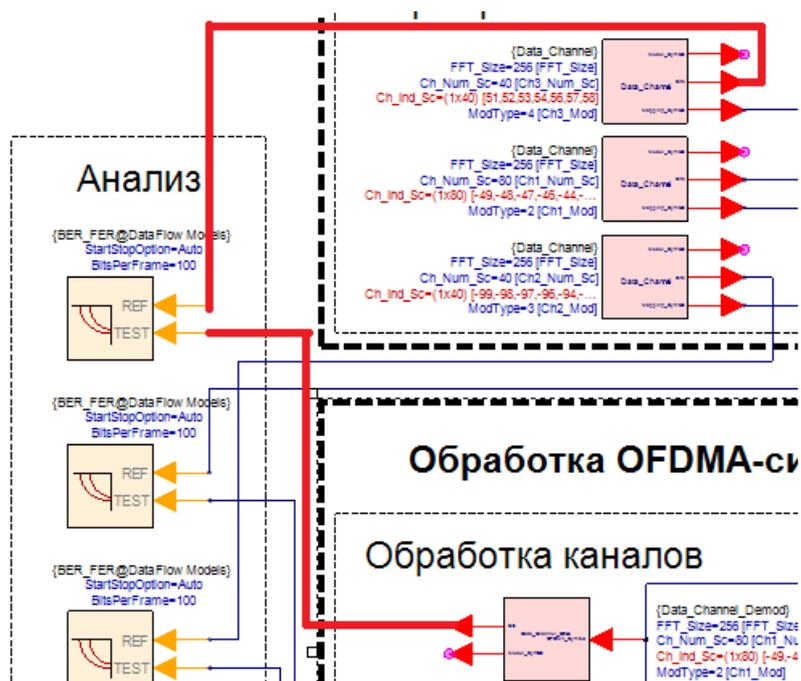


Разместите на схеме параллельно 3 канальных демодулятора. Параметры для каждого демодулятора установите исходя из параметров формирования каждого канала. Вход каждого из них соедините с выходом блока БПФ (FFT_Cx) как показано на рисунке:



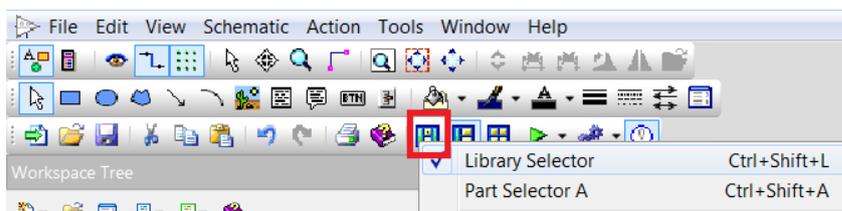
Для проверки работоспособности модели OFDMA-системы требуется расчет вероятности битовой ошибки. Для этого разместите на схему 3 блока BER_FER. В параметрах блока укажите работу с отсчетами (Samples): Подайте на вход TEST блоков BER_FER выходы

соответствующих канальных демодуляторов, а на вход REF – выход **Bits** блока формирования канала как показано на рисунке:

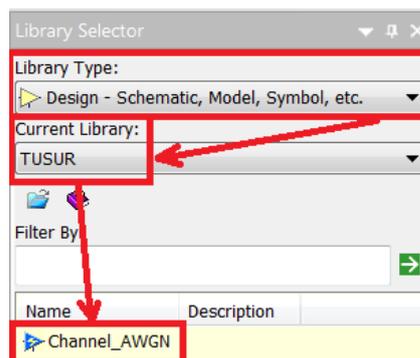


5. Добавление модели канала РВВ с АБГШ

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:



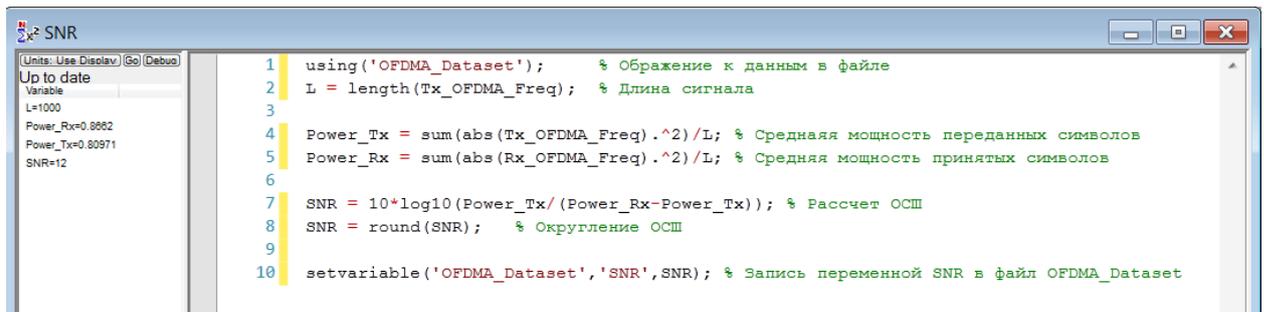
Далее требуется выбрать тип библиотеки и созданную вами ранее библиотеку, в которой хранится сохраненная ранее подсистема Channel_AWGN. Добавьте подсистему в каталог проекта двойным нажатием и разместите на схеме между OFDMA-передатчиком и приемником (схема полной модели приведена в приложении):



6. Анализ данных

6.1 Расчет отношения сигнал/шум на входе демодулятора

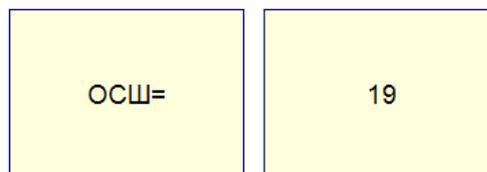
Для расчета отношения сигнал/шум (ОСШ) требуется сравнить среднюю мощность сформированного OFDMA-символа в передатчике и принятого OFDMA-символа в приемнике. Алгоритм расчета возьмите из предыдущей работы. Создайте новый файл уравнения (Equation – назв. SNR). Запишите в уравнение выражения, приведенные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



```
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
```

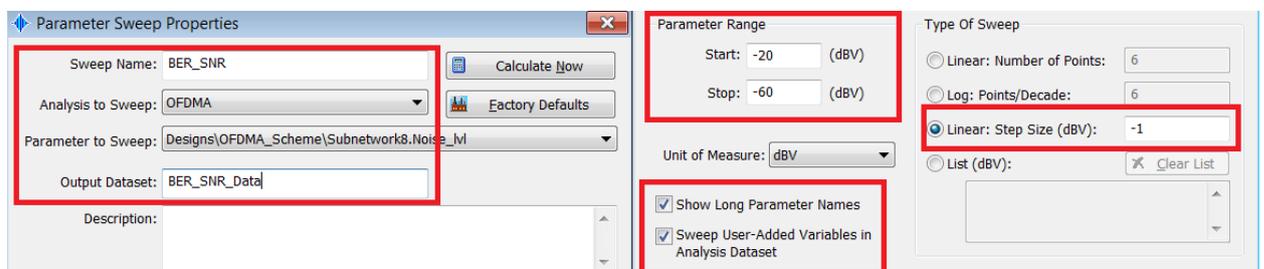
Tx_OFDMA_Freq – отсчеты с выхода сумматора в OFDMA-формирователе, а Rx_OFDMA_Freq – отсчеты после блока БПФ в OFDMA-приемнике.

Для вывода результатов расчета ОСШ на экран воспользуйтесь инструментом Text в окне инструментов (Напоминание: 1-е текстовое окно ОСШ =; 2-е текстовое окно = SNR):

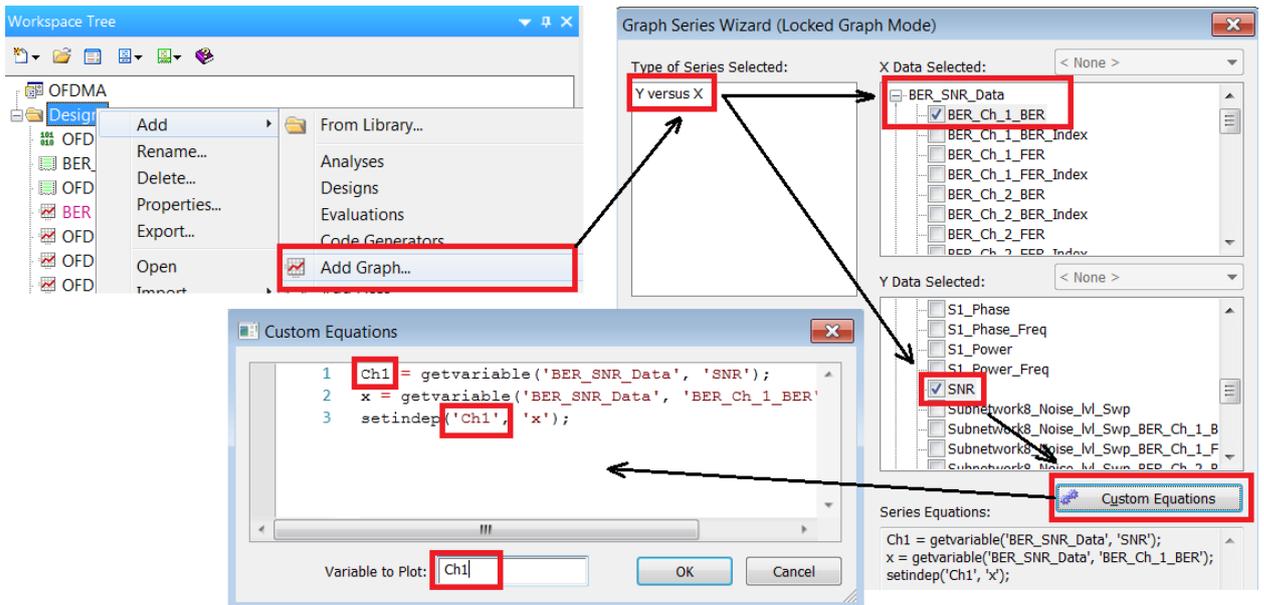


6.2 Анализ данных. Циклическая симуляция. Зависимость битовых ошибок для каждого канала от ОСШ на входе демодулятора.

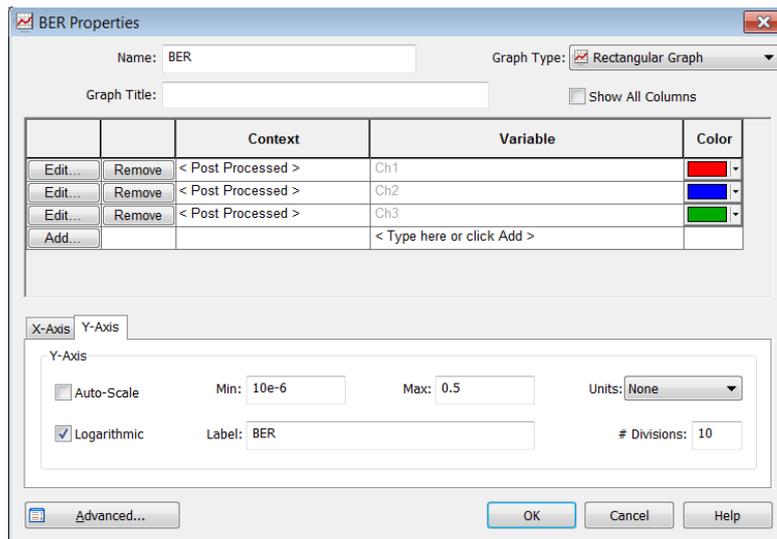
Создание циклической симуляции и анализ данных были рассмотрены в прошлой работе. Создайте новую циклическую симуляцию (Sweep) с параметрами, приведенными на рисунке:



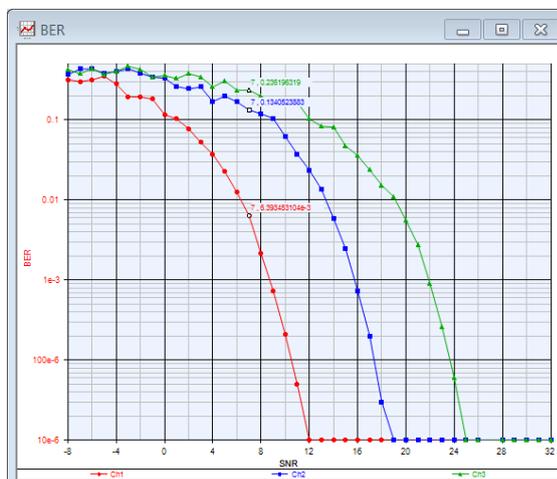
Проведите измерения вероятности битовой ошибки для всех каналов и постройте графики зависимости битовой ошибки от ОСШ для всех каналов в одном окне. Для первого канала это будет выглядеть следующим образом:



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 следующим образом:



И сам график измерений:



Лабораторное задание

Самостоятельно сформируйте OFDMA-символы со следующими параметрами:

Вариант	1	2	3	4	5	6
Модуляция (канал 1, канал 2, канал 3)	BPSK, QPSK, QAM-16	QPSK, QAM-16, QAM-64	QAM-64, QAM-256 BPSK	QPSK, QAM-64 BPSK	BPSK QAM-64 QPSK	QPSK QAM-64 QAM-256
Доля каждого канала от общего количества поднесущих (канал 1, канал 2, канал 3):	1/6 3/6 2/6	2/6 6 2/6 6	4/6 1/6 1/6	5/6 1/12 1/12	3/6 1/6 2/6	2/12 5/12 5/12
Количество поднесущих (всего)	20 0	30 0	800	150 0	50	600
Размер Фурье	25 6	51 2	102 4	204 8	128	102 4
Циклич. префикс	40	13 0	100	288	10	144
Расположение поднес.	це нтр	це нтр	цен тр	цен тр	цен тр	цен тр

Лабораторная работа № 3

Процедура эквалайзирования в OFDMA

Цель работы

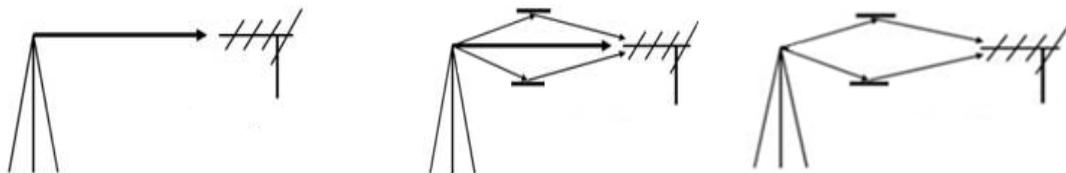
Целью работы является изучение влияния канала многолучевого распространения на OFDMA-символ; компенсация искажений, вызванных частотно-селективными замираниями в канале (эквалайзирование).

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.

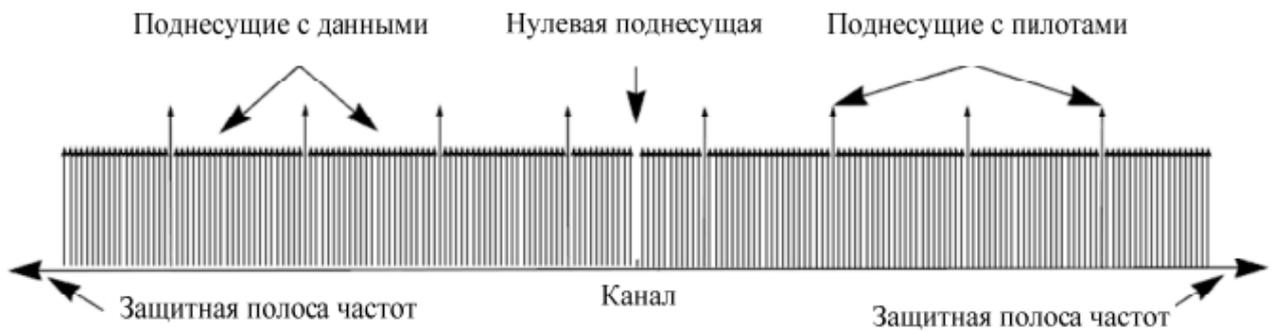
Если задержка соизмерима с периодом несущего колебания, то ее можно считать эквивалентной фазовому сдвигу, и результатом сложения будет усиление или ослабление принимаемого сигнала. При непостоянстве задержки возникают замирания. Если задержка одного сигнала относительно другого соизмерима с длительностью 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 а – модель канала Гаусса (прямой луч), б – модель канала Релея (прямой и отраженные лучи) в – модель канала Райса (отраженные лучи):



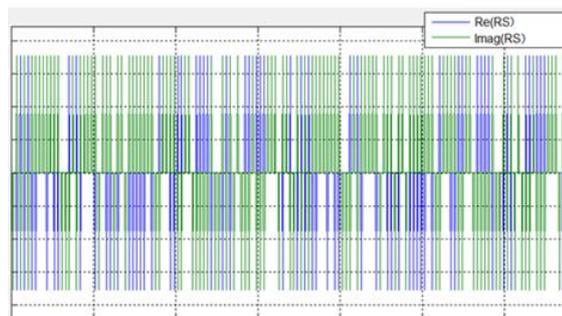
а	б	в
---	---	---

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. 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.

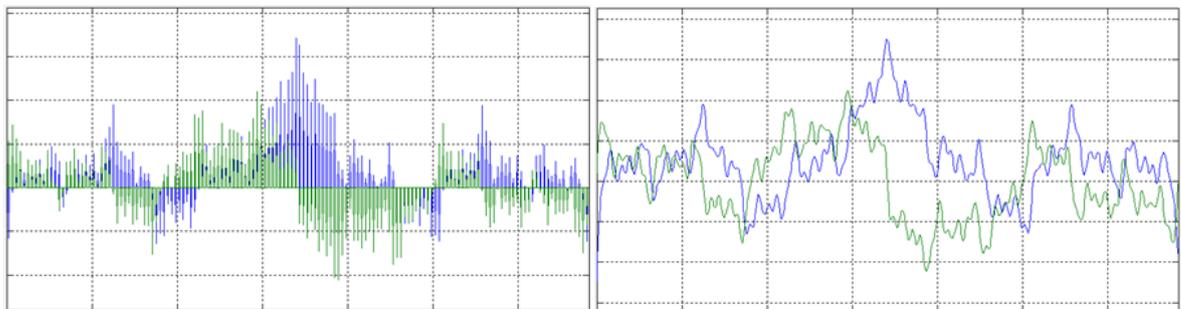


Структура OFDMA-символа

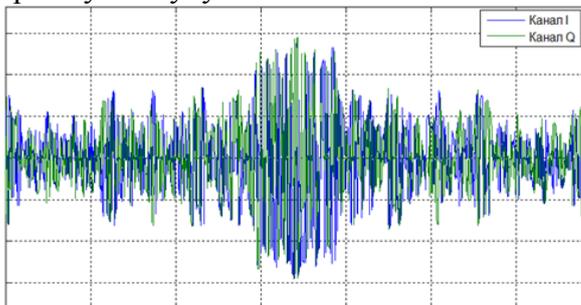
Полученная передаточная функция канала интерполируется на весь спектр OFDMA-символа, после чего каждый спектральный отсчет символа делится на соответствующее значение функции интерполяции. На рисунках ниже приведены комплексные спектральные отсчеты для:



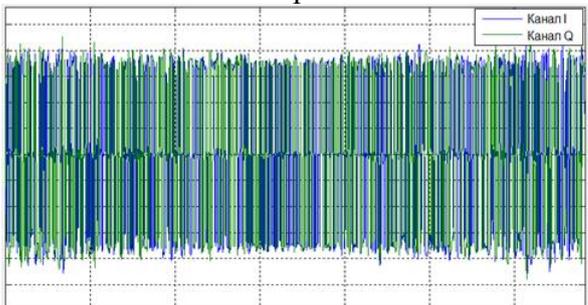
Сформированный в передатчике OFDMA-символ



Оценка передаточной функции канала по опорному сигналу



Интерполяция передаточной функции канала на весь спектр OFDMA



OFDMA-символ после канала РРВ до эквалайзера

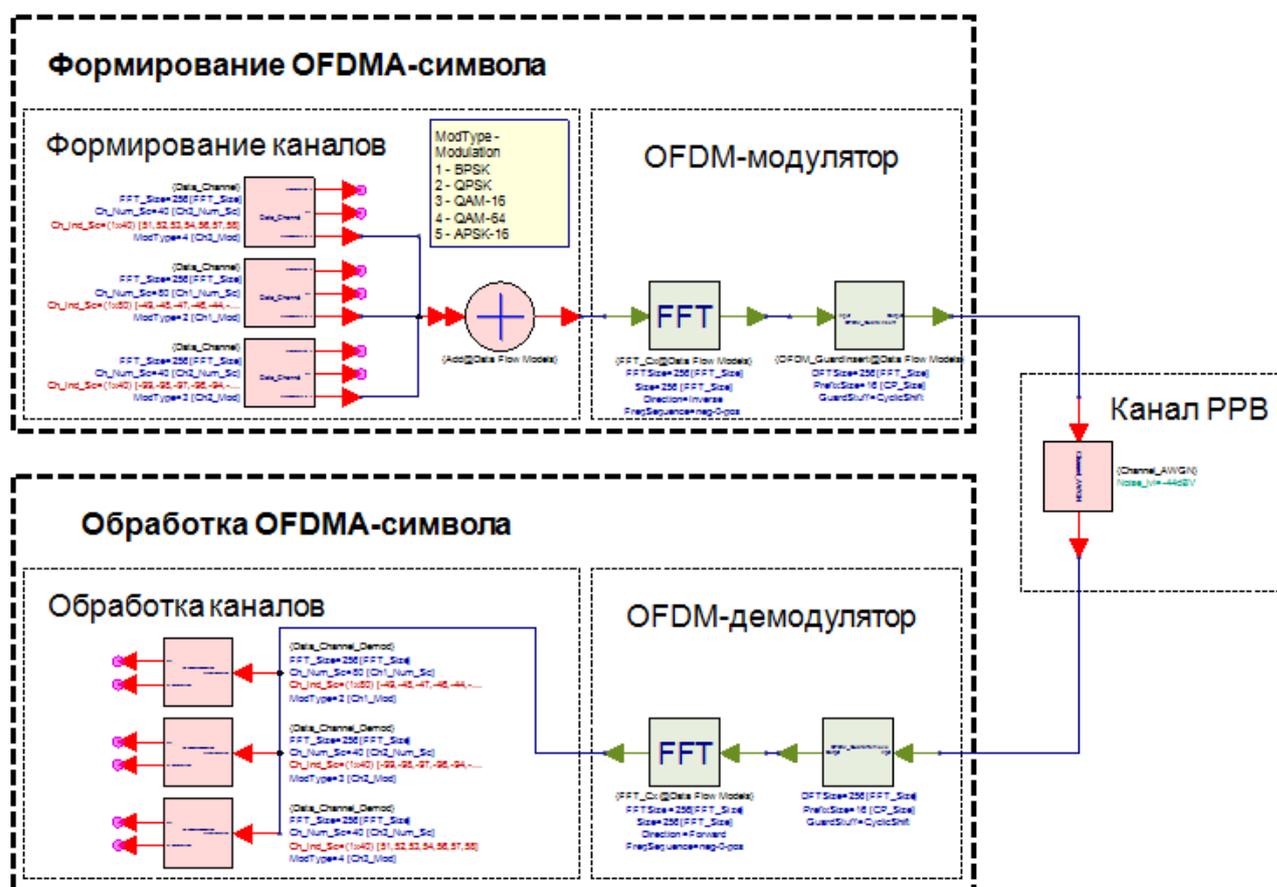
OFDMA-символ после эквалайзера в приемнике

Моделирование процедуры эквалайзирования OFDMA в SystemVue

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

1. Создание нового проекта

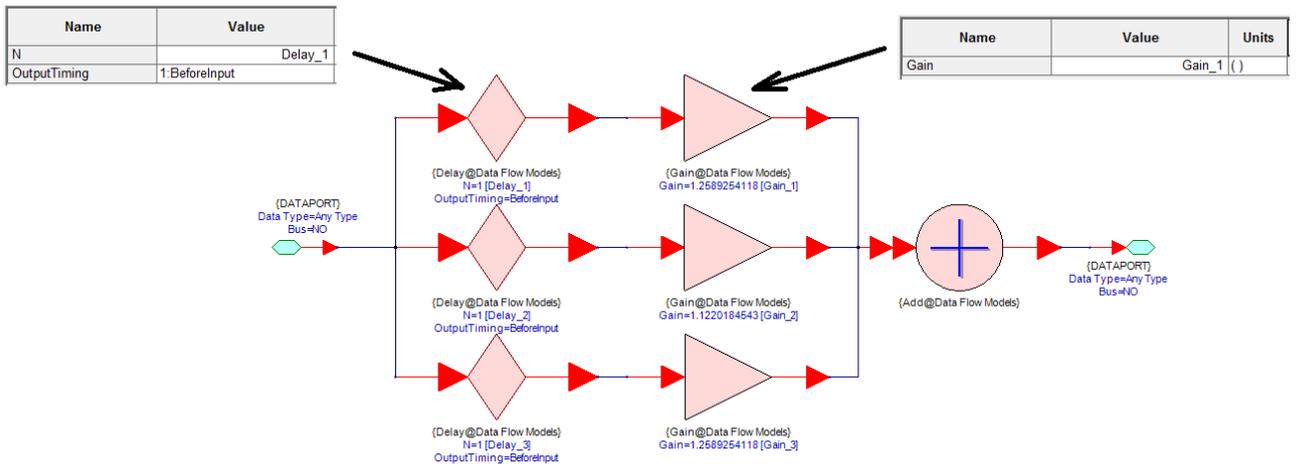
Откройте проект *OFDMA*, который был завершен в предыдущей работе. Сохраните его под названием *OFDMA_Eq*. Настройки параметров симуляции и названия исполняемых файлов проекта оставьте неизменными. Схема модели уже имеющейся модели представлена на рисунке ниже. На этой схеме отсутствуют порты для сбора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



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

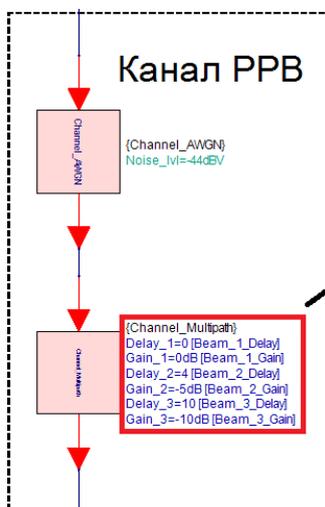
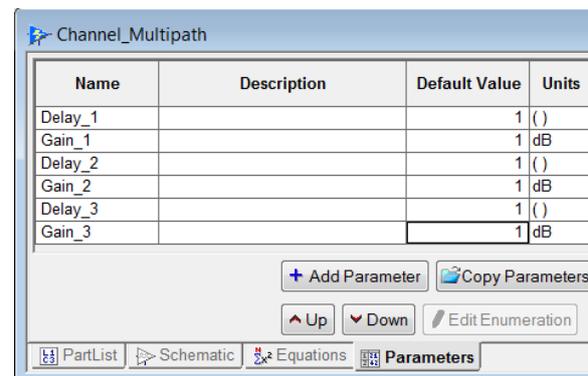
2. Канал многолучевого распространения.

Многолучевой канал распространения можно представить в виде простой суммы всех лучей в электромагнитном поле 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 ниже:

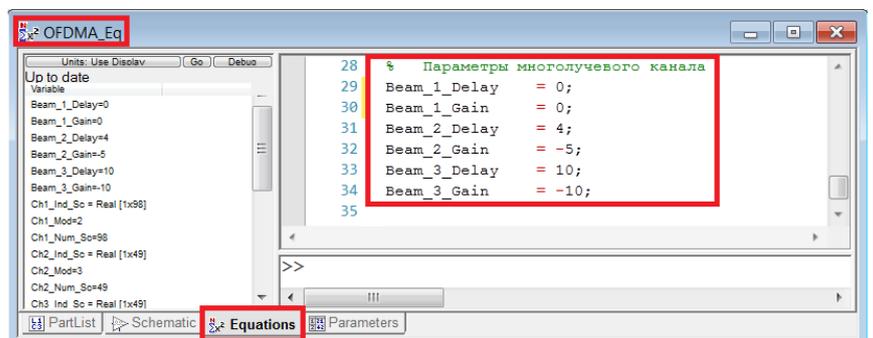


Блок Delay отвечает за задержку каждого луча на N отсчетов, а блок Gain отвечает за ослабление луча на трассе на K дБ. В параметрах подсистемы укажите 6 переменных, по одной величине задержки и ослабления в дБ (!) для каждого луча.

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:

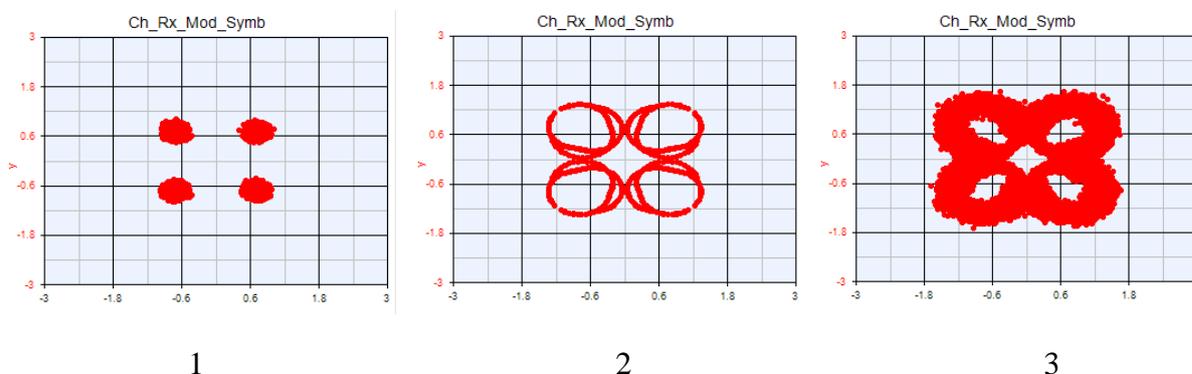


Name	Value	Units
Delay_1	Beam_1_Delay	()
Gain_1	Beam_1_Gain	dB
Delay_2	Beam_2_Delay	()
Gain_2	Beam_2_Gain	dB
Delay_3	Beam_3_Delay	()
Gain_3	Beam_3_Gain	dB

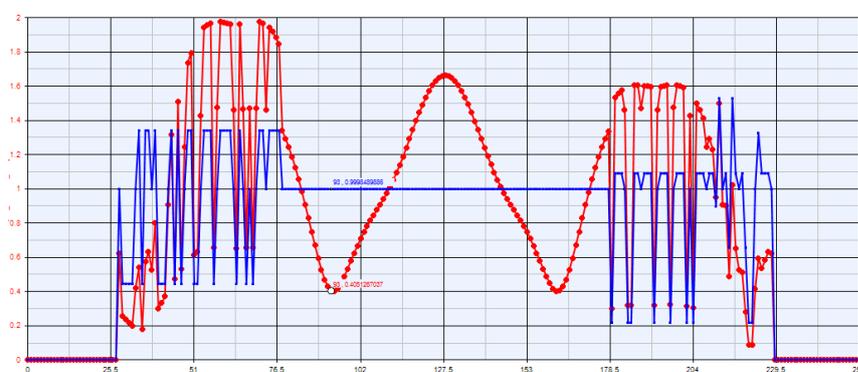


Созданный канал PPB включает в себя мультипликативную и аддитивную помехи, которые всегда являются составляющей беспроводного канала связи. Для того чтобы наглядно оценить влияние канала на OFDMA-символ, постройте диаграммы созвездия символов модуляции с выхода канального селектора любого из 3-х каналов 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 приведены диаграммы созвездий канала с QPSK модуляцией:



При этом спектральная плотность мощности OFDMA-символа искажается:

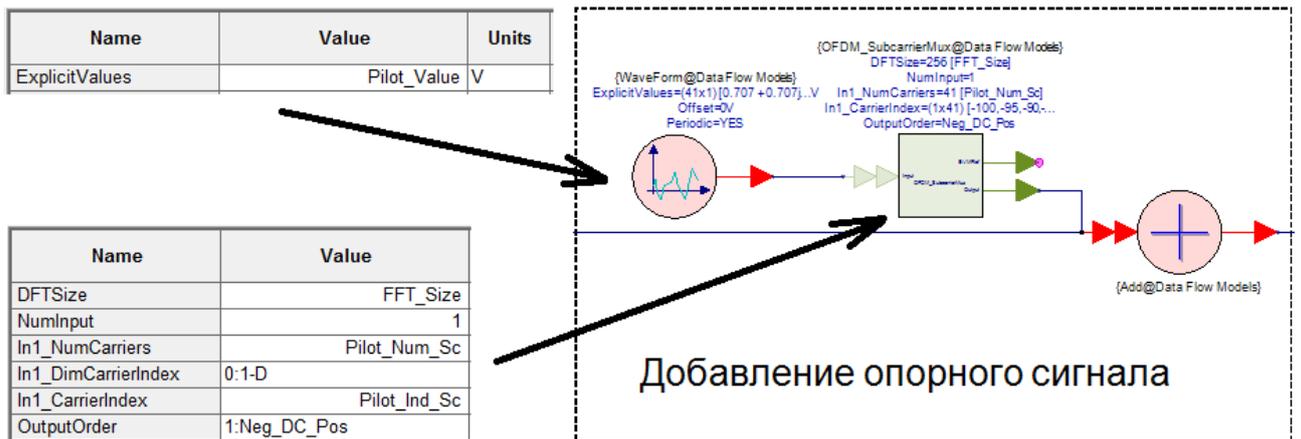


На рисунке представлены отсчеты спектральной плотности мощности OFDMA-символа: 1 - до многолучевого канала распространения (синий); 2 – после многолучевого канала распространения (красный). Ясно, что если не компенсировать искажения, корректная демодуляция данных становится невозможной. Для компенсации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



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*:

```

% --- 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

```

(!) *P_Step* – период расположения пилотов в спектра 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 ниже:

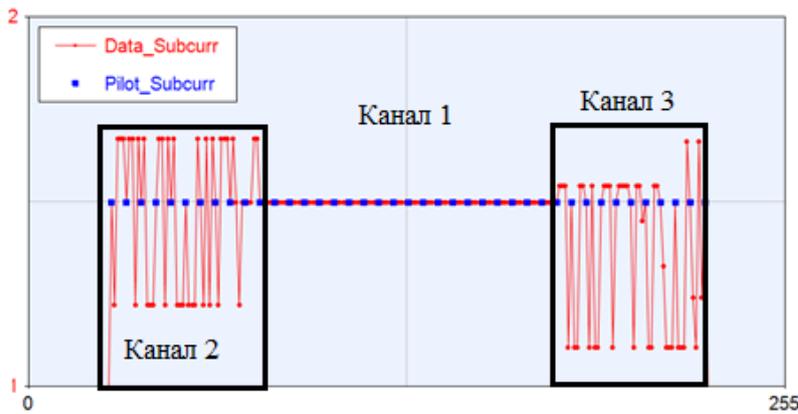
```

% 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)

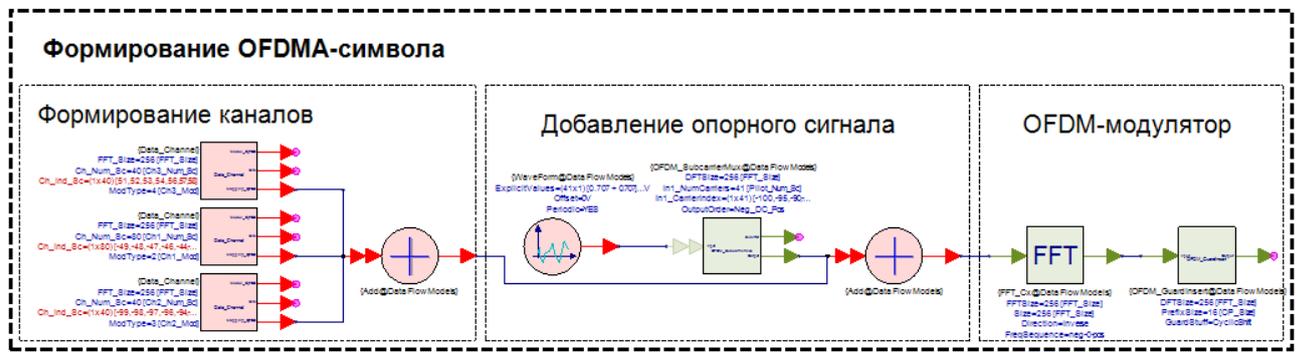
```

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. Отсчеты спектральной плотности мощности

OFDMA-символа на входе OFDM-модулятора представлены на рисунке ниже. Здесь отмечены пилотные поднесущие (синие) и поднесущие с данными (красные):



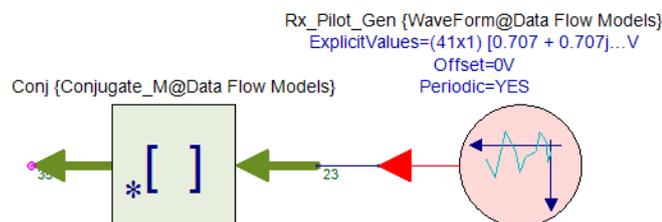
Полная схема формирования OFDMA-символа представлена на рисунке ниже:



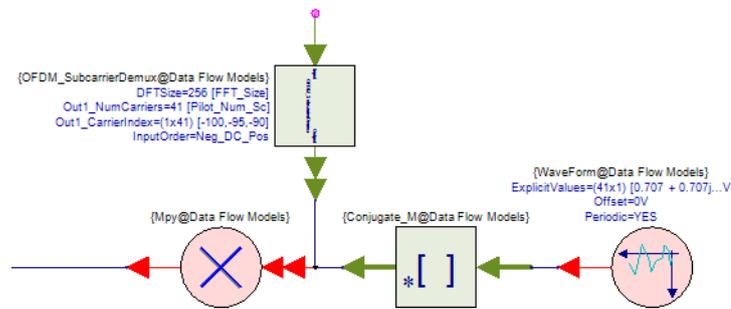
4. Эквалайзер

Задачей эквалайзера является коррекция частотно-селективных искажений в спектре OFDMA-символа.

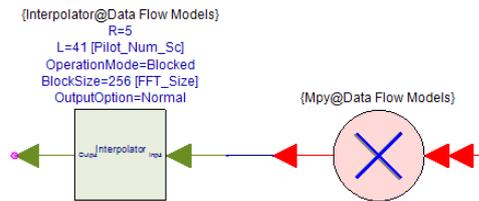
Генерирование комплексно сопряженного опорного сигнала в приемнике:



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.



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



В параметрах интерполятора указываются:

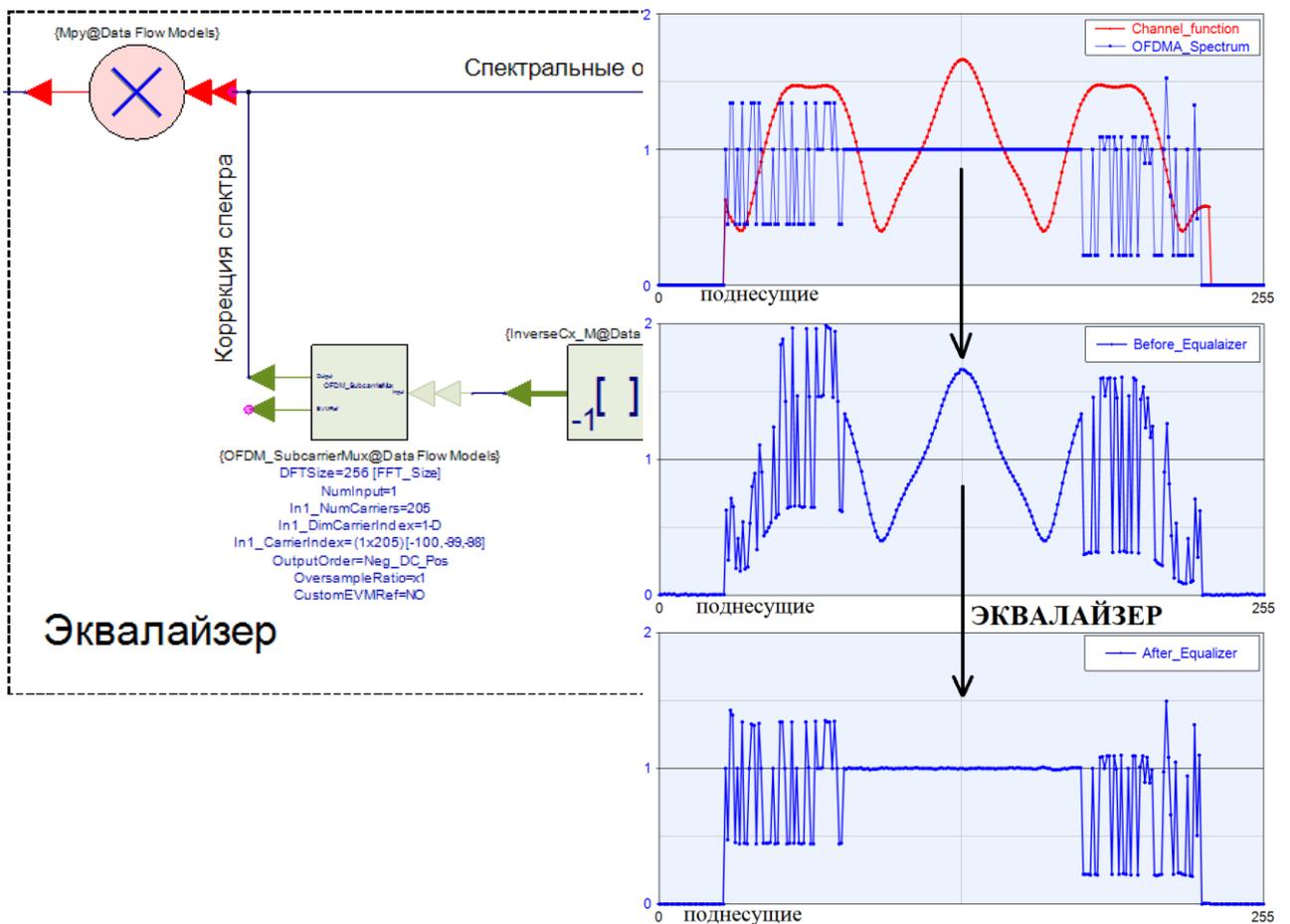
Name	Value
R	Pilot_Step
L	Pilot_Num_Sc
Alpha	0.5
SNR	100
OperationMode	0:Blocked
BlockSize	FFT_Size
OutputOption	0:Normal

Шаг расположения пилотов

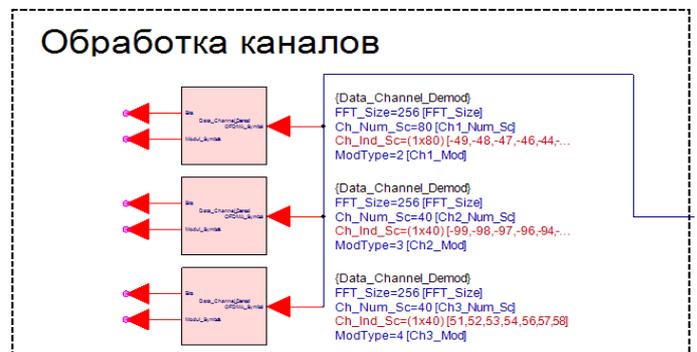
Количество пилотов

Формирование выходных отсчетов в виде единого блока размером BlockSize

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 ниже:

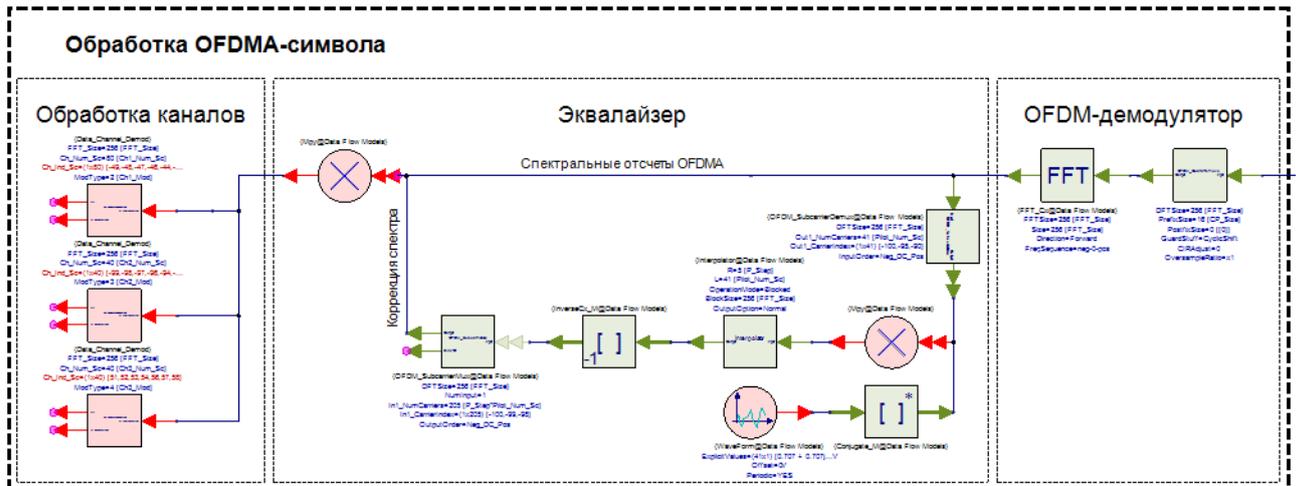


Чтобы наглядно увидеть результат работы эквалайзера, постройте графики спектральной плотности мощности OFDMA-символа для 3-х случаев: 1) – в передатчике, 2) – в приемнике до эквалайзера; 3) – в приемнике после эквалайзера. На рисунках изображен процесс эквалайзирования. На первом графике видно, что на 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.

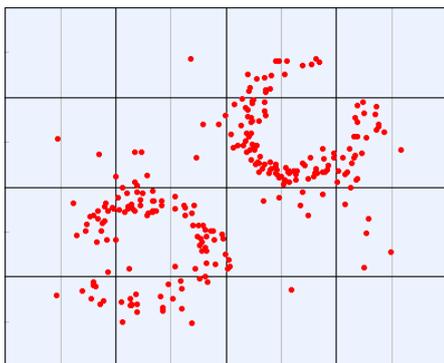


5. Обработка канальных данных

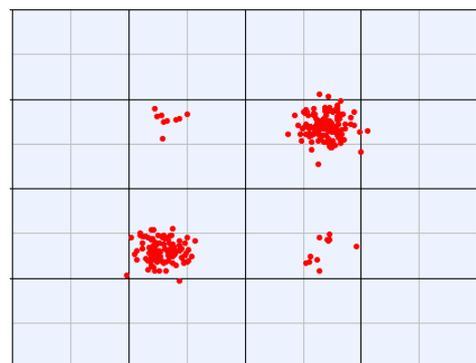
После процедуры эквалайзирования становится возможным корректная демодуляция данных в каждом канале. Обработка канальных данных остается такой же, как в предыдущей работе, посвященной OFDMA. Отсчеты с выхода эквалайзера поступают на вход канального селектора, который выбирает отсчеты соответствующего 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. Полная схема OFDMA-приемника изображена на рисунке ниже:



Постройте диаграмму созвездия с выхода селектора любого канала для 2-х случаев: до (сразу после OFDM-демодулятора) 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.



до эквалайзера



после эквалайзера

Лабораторная работа № 4

Процедура частотной синхронизации в OFDM системах связи

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 рис. 1.

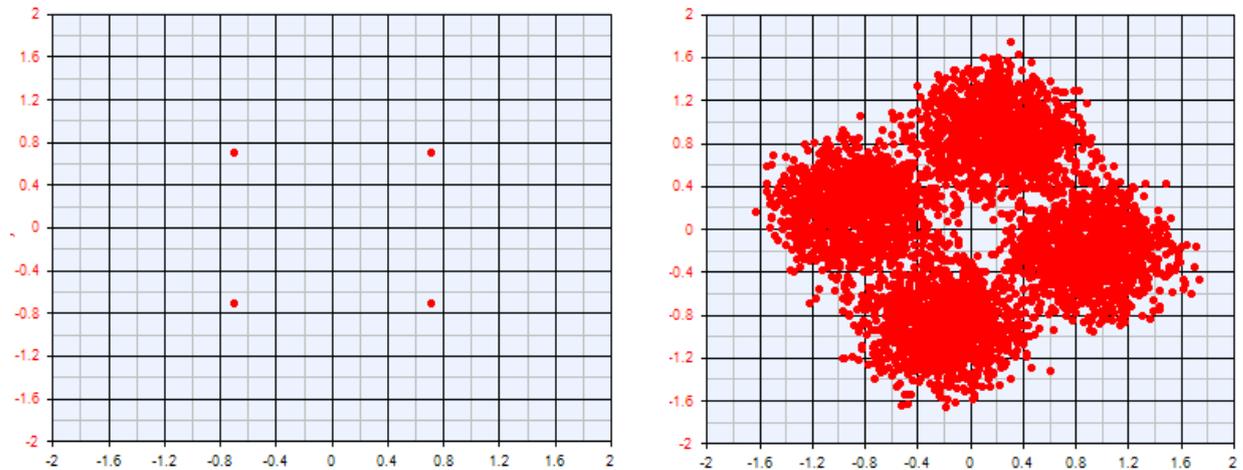


Рис. 1 Созвездие OFDM QPSK

Созвездие OFDM QPSK без частотного сдвига	Созвездие OFDM QPSK с частотным сдвигом
---	---

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.

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:

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

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

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

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.

Моделирование процедуры частотной синхронизации OFDM системы в SystemVue.

В рамках лабораторной работы предлагается изучить алгоритм процедуры частотной синхронизации OFDM сигналов

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 рис. 2.

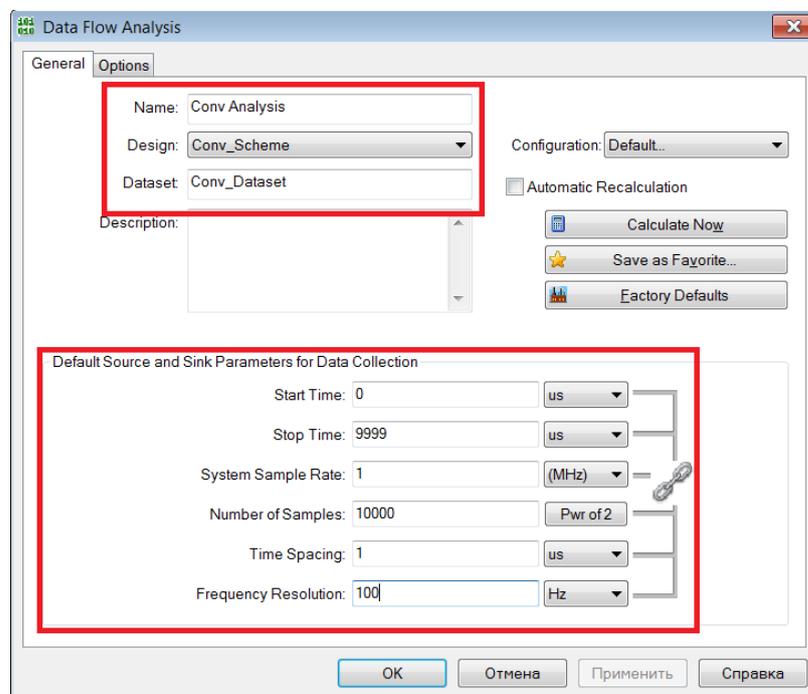


Рис. 2 Параметры файла *FSync Analysis*

2. Создание модели передатчика

Схема модели OFDM-передатчика представлена на рис. 3. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

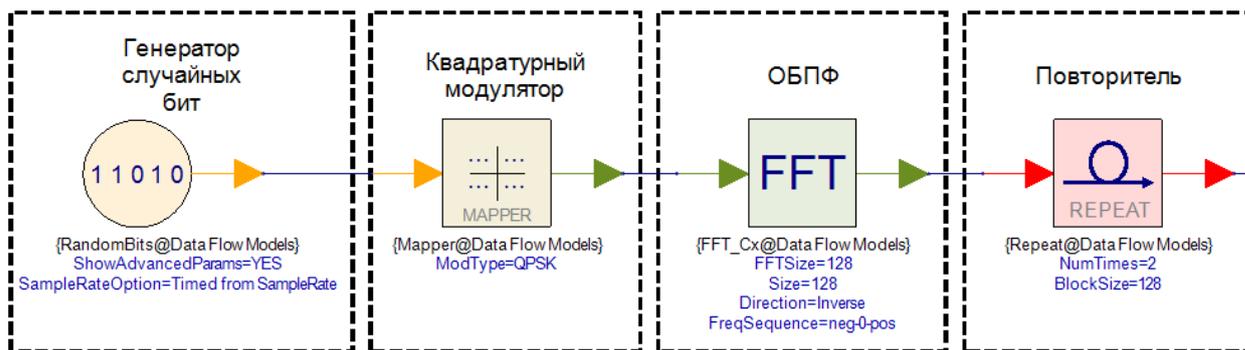


Рис. 3 Модель OFDM-передатчика

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 рис. 4. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

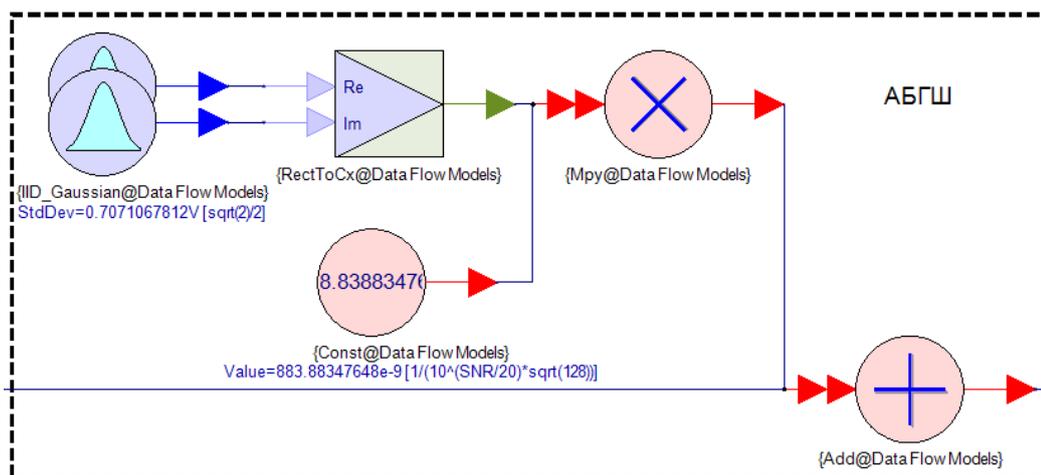


Рис. 4 Модель канала распространения с АБГШ

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 *StdDev*) = $\sqrt{2}/2$. Комплексный случайный сигнал перемножается с коэффициентом блока *Const*, 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 рис. 5. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

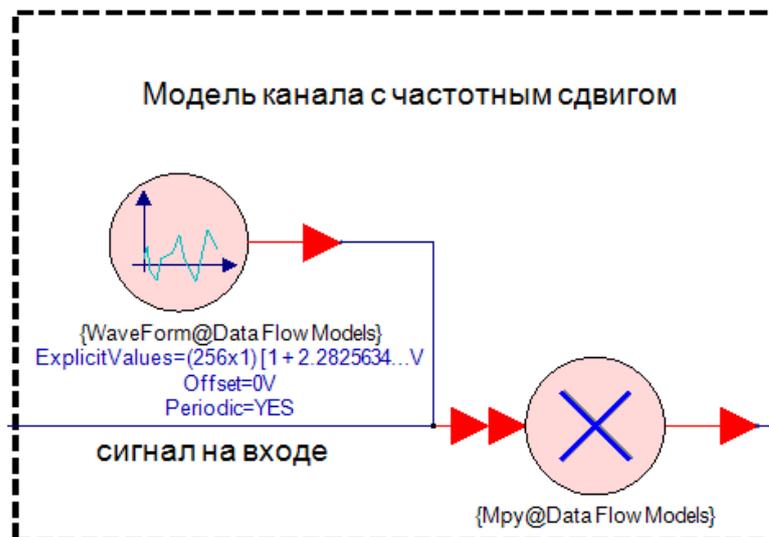


Рис. 5 Модель канала распространения с частотным сдвигом

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 рис. 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
```

Рис. 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 рис. 6 изображена схема модели демодуляции OFDM-символа и вычисления ВКФ. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

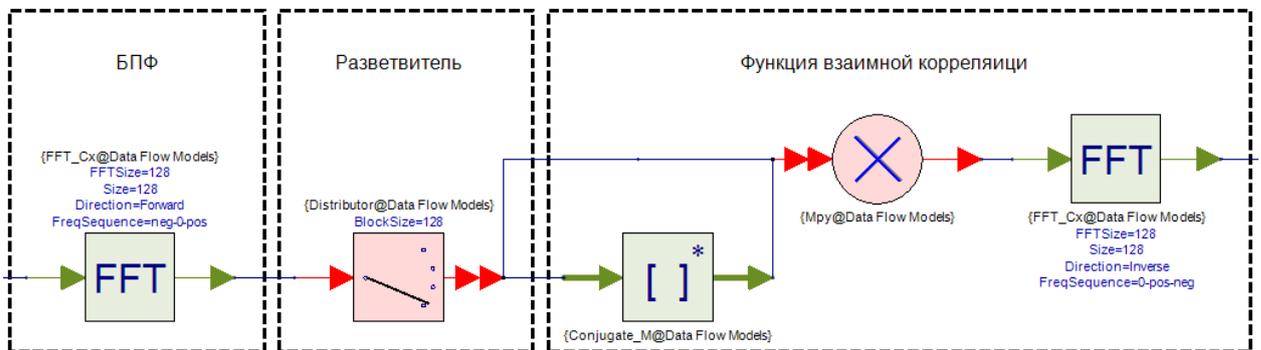


Рис. 6 Демодуляция и ВКФ OFDM-символа

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.

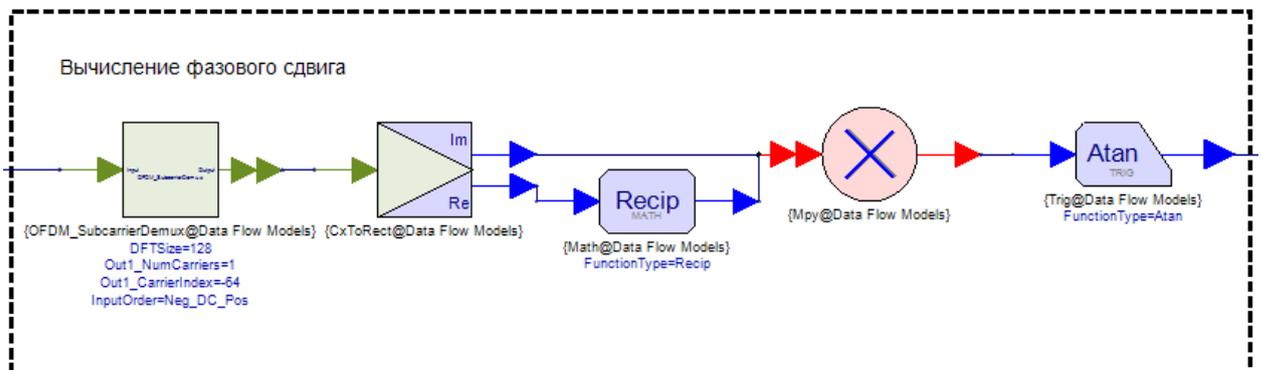


Рис. 7 Вычисление фазового сдвига

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

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

Схема модели вычисления СКО ошибки фазы представлена на рис. 8. В подписях к блокам модели отражены основные параметры.

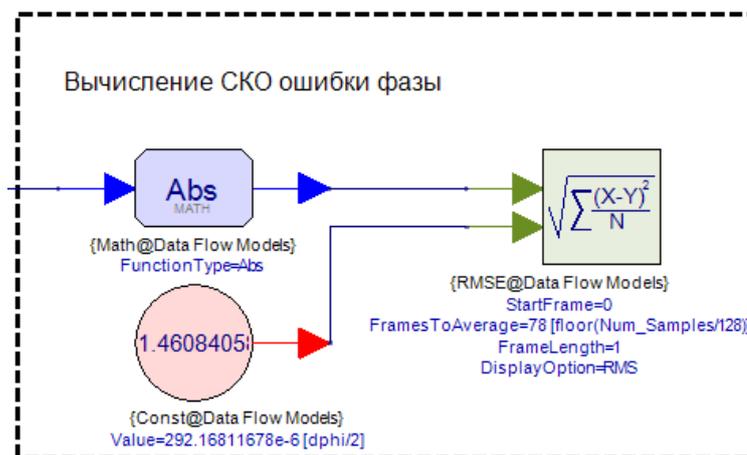


Рис. 8 Вычисление СКО ошибки фазы

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 рис. 9.

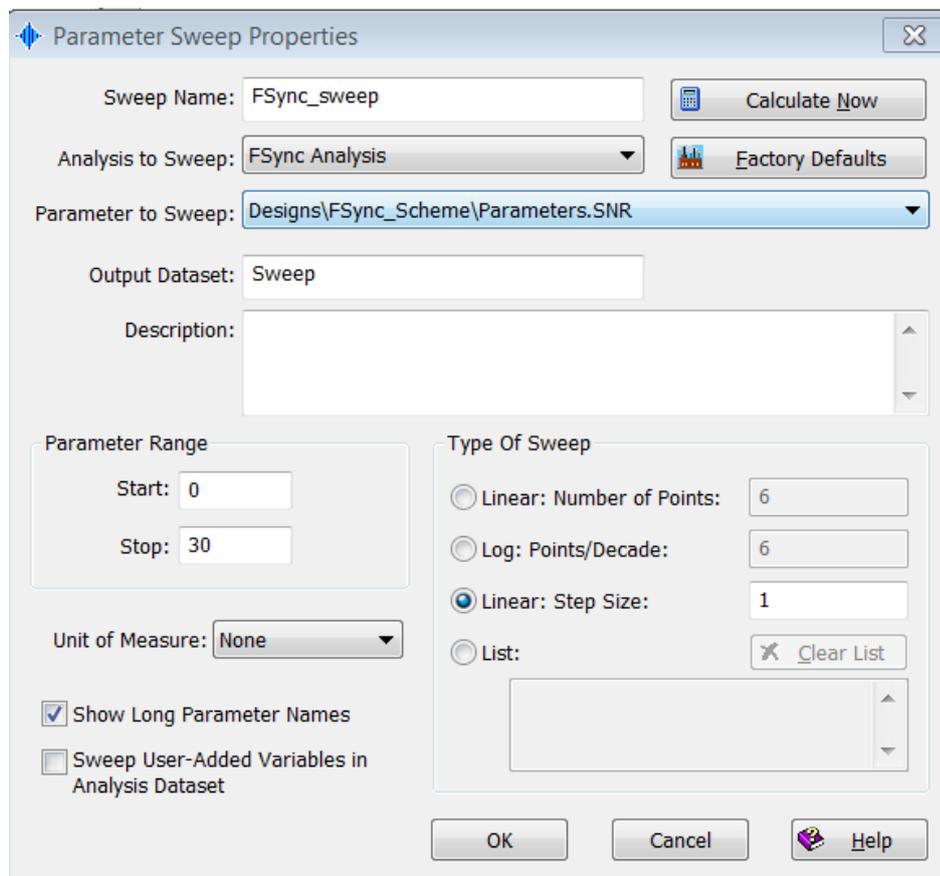


Рис. 9 Настройки файла Sweep

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. 10).



Рис. 10 Запись выражения перевода значения фазы в значение частоты

Список рекомендуемой литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд., исправл.: Пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2003.-1104 с.
2. В.П. Ипатов, В.К. Орлов, И.М. Самойлов, В.Н. Смирнов Системы мобильной связи: Учебное пособие для вузов /; Под ред. В.П. Ипатова. – М.:Горячая линия – Телеком, 2003.-272с.
3. Прокис Дж. Цифровая связь. –М. :Радио и связь, 2000 -797 с.
4. Василенко Г.О., Милютин Е.Р. Расчет показателей качества и готовности цифровых радиорелейных линий связи. –СПб.: Издательство «Линк», 2007.
5. Волков Л.Н. и др. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учебное пособие. М.: Эко–Трендз, 2005.
6. Fundamentals of WiMax: understanding broadband wireless networking/ Jtffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Ria Muyaamed. 2007, 449 p.