

Содержание

Введение	5
1 Обзор основных особенностей систем связи стандарта LTE.....	7
1.1 Особенности архитектуры сети.....	7
1.2 Основные особенности радиointерфейса.....	21
2 Обзор возможностей CAPE ADS.....	35
3 Разработка модели нисходящего канала связи стандарта LTE.....	37
3.1 Формирование сигнала в нисходящем канале.....	37
3.2 Формирование модели нисходящего канала	48
3.3 Результаты моделирования нисходящего канала.....	54
4 Разработка модели восходящего канала связи стандарта LTE.....	60
4.1 Формирование сигнала в восходящем канале	60
4.2 Формирование модели восходящего канала	67
4.3 Результаты моделирования восходящего канала	70
5 Раздел экономики и организации разработки модели	73
5.1 Этапы разработки модели	73
5.2 Расчет заработной платы и других отчислений разработчикам.....	74
5.3 Расчет затрат на организацию программно-аппаратного комплекса	77
5.4 Расчет стоимости конечного продукта.....	78
5.5 Выводы.....	79
Заключение	80
Библиография.....	81

1 Обзор возможностей САПР ADS

Система автоматизированного проектирования Advanced Design System (ADS) фирмы Agilent Technologies представляет собой одну из самых мощных систем проектирования с расширенными возможностями, которая предлагает разработчикам передовые технологии моделирования.

Система ADS содержит все функции, которые необходимы для разработки и проектирования аналоговых и цифровых радиотехнических устройств, всего пути распространения сигнала, проводной или радиосвязи, проектирование печатных плат, разработку монолитных интегральных схем и пространственных электромагнитных структур, а также разводку печатных плат.

В библиотеках элементов ADS содержится описание более 100 000 комплектующих изделий, а также средства разработки интегральных микросхем от ведущих производителей. Библиотеки проектирования ADS позволяют осуществлять разработку в соответствии с новейшими стандартами. Модели и методы моделирования, используемые в ADS, обладают высокой точностью и степенью достоверности. Кроме того, в ADS предусмотрена интеграция со средой Matlab.

ADS является средой, которая совмещает несколько эффективных технологий моделирования. Она позволяет определять или импортировать высокочастотные, аналоговые и цифровые параметры, а также ключевые параметры взаимодействия моделей.

ADS предоставляет широкие возможности моделирования на системном, схемном и физическом уровнях в целях определения всех характеристик разрабатываемого изделия. Система ADS предлагает наиболее полный спектр технологий моделирования и предоставляет возможность проводить анализ по постоянному и переменному току, анализ схем в малосигнальном режиме, исследовать переходные процессы, полученные анализом во временной области, проводить расчет S-параметров, использовать методы гармонического баланса, комплексной огибающей. При совместном использовании они позволяют

полностью характеризовать и оптимизировать проектирование при множестве условий.

Важным качеством системы ADS является удобный и понятный интерфейс, что означает в последствии и простоту проектирования. Таким образом, использование САПР ADS позволяет ускорить проектирование радиоэлектронной аппаратуры и сократить время выхода продукции на рынок потребителей. Развитая архитектура системы дает возможность совместного моделирования, что позволяет объединять типы и области моделирования.

Связь со средой Agilent VEE обеспечивает управление приборами, комплексное манипулирование данными и их совместное применение, а также автоматизацию настройки схем измерения, позволяя создавать технические решения с учетом конкретных требований, необходимых для проверки правильности разработок. [11]

На всех стадиях процесса разработки анализ подсоединенных сигналов позволяет совместно использовать реальные и полученные в результате моделирования сигналы, устройства и функциональные блоки. Варианты технических решений могут быть полностью исследованы без создания дорогостоящих макетов и выполнения дополнительных этапов проектирования.

2 Разработка модели нисходящего канала связи стандарта LTE

2.1 Формирование сигнала в нисходящем канале

При разработке схемы модели необходимо учитывать то, что в нисходящем канале передаются данные нескольких физических каналов, а также опорные и синхросигналы.

2.1.1 Передача пользовательских данных в нисходящем канале

Формирование сигнала в нисходящем канале достаточно стандартно для современных систем цифровой передачи информации (рисунок 1). Оно включает процедуры канального кодирования, скремблирования, формирования модуляционных символов, их распределения по антенным портам и ресурсным элементам (процедура предварительного кодирования) и синтеза OFDM-символов [12].

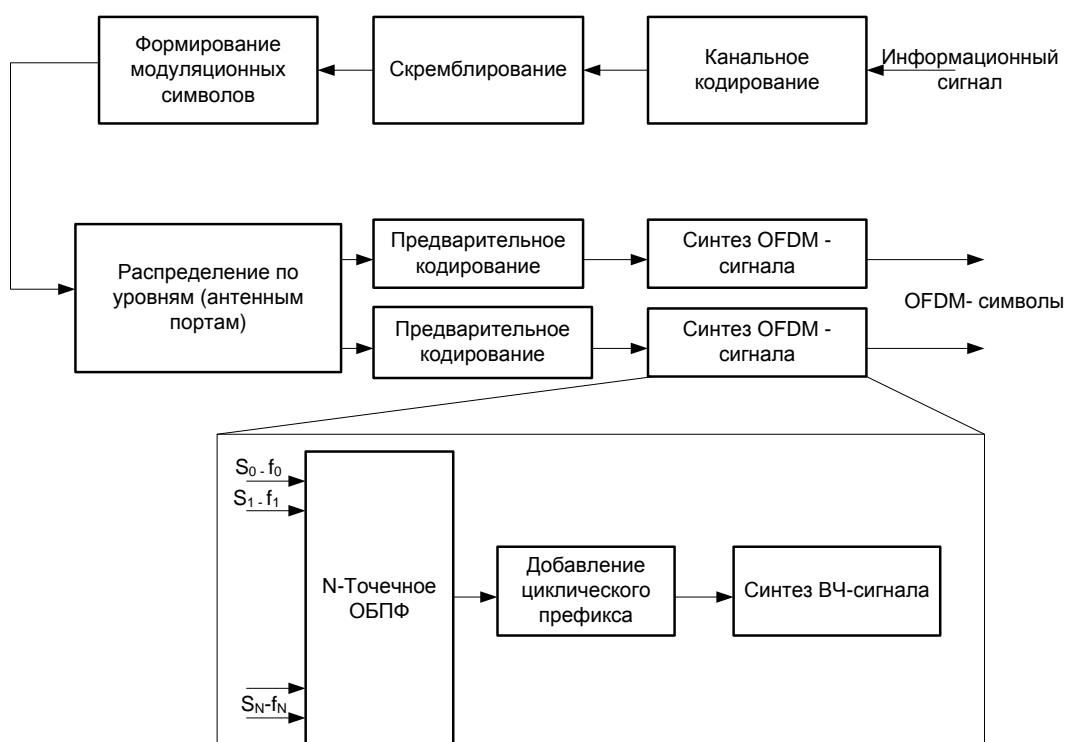


Рисунок 1 - Схема обработки информационного сигнала в нисходящем канале стандарта LTE

Канальное кодирование включает в себя несколько процедур (рисунок 2).

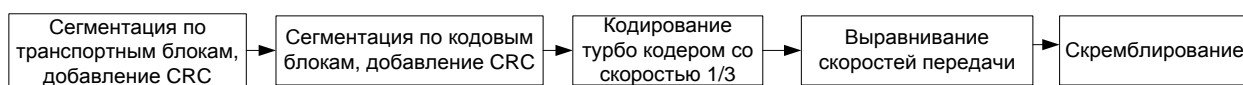


Рисунок 2 - Процесс канального кодирования

Изначально к блокам информационных данных присоединяются контрольные суммы. Алгоритм вычисления контрольной суммы (Cyclic redundancy code (CRC) — циклический избыточный код) — способ цифровой идентификации некоторой последовательности данных, который заключается в вычислении контрольного значения её циклического избыточного кода. Размер CRC может быть 24, 16, 8 бит.

Алгоритм CRC базируется на свойствах деления с остатком двоичных многочленов. Значение CRC является по сути остатком от деления многочлена, соответствующего входным данным, на некий фиксированный порождающий полином.

Биты четности генерируются следующими циклическими генераторными полиномами:

$$g_{\text{CDC}_{24\text{A}}}(\text{D})=\text{D}^{24}+\text{D}^{23}+\text{D}^{18}+\text{D}^{17}+\text{D}^{11}+\text{D}^{10}+\text{D}^7+\text{D}^6+\text{D}^5+\text{D}^3+\text{D}+1, \quad (2)$$

$$g_{\text{CDC}_{24\text{B}}}(\text{D})=\text{D}^{24}+\text{D}^{23}+\text{D}^6+\text{D}^5+\text{D}+1, \quad (3)$$

$$g_{\text{CDC}_{16}}(\text{D})=\text{D}^{16}+\text{D}^{12}+\text{D}^5+\text{D}+1, \quad (4)$$

$$g_{\text{CDC}_{8}}(\text{D})=\text{D}^8+\text{D}^7+\text{D}^4+\text{D}^3+\text{D}+1. \quad (5)$$

Далее следует процесс сегментации по кодовым блокам. Эта процедура имеет место, если размер транспортного блока превышает максимально допустимый размер кодового блока. Тогда транспортный блок разбивается на кодовые блоки, и к каждому кодовому блоку добавляется поле контрольной суммы длиной 24 бита. Максимальный размер кодового блока составляет 6144

бита. Если размер транспортного блока меньше или равен максимальному размеру кодового блока, то данная процедура не выполняется.

Блоки с присоединенными контрольными суммами обрабатываются посредством турбокодера со скоростью кодирования 1/3. В качестве кодера турбокода используется схема двух параллельно связанных сверточных кодеров с внутренним перемежителем (рисунок 3).

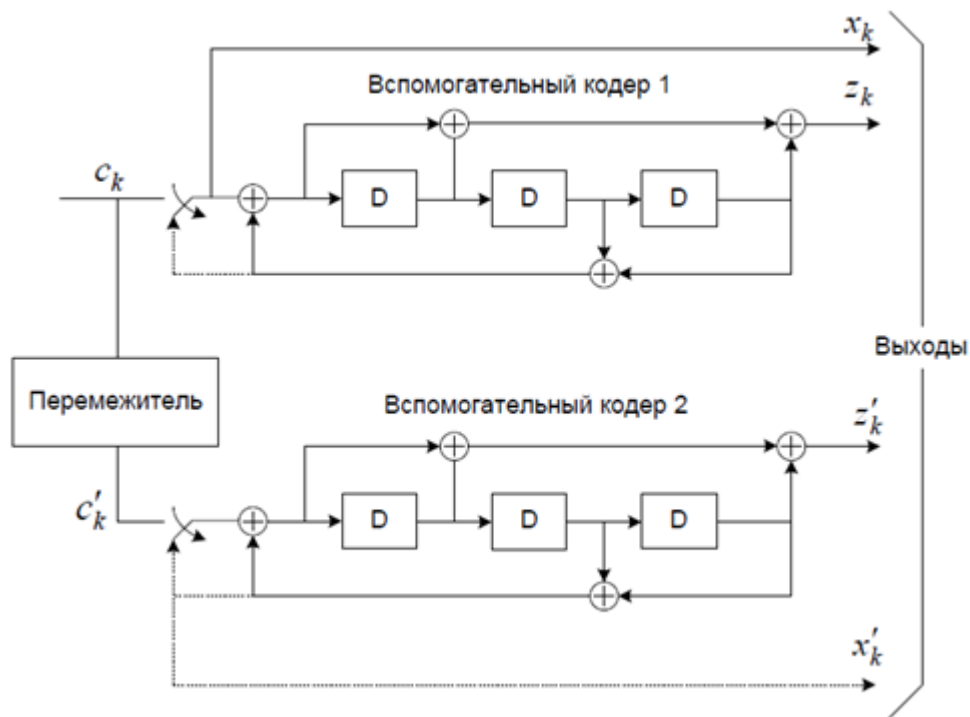


Рисунок 3 - Турбо кодер

В начале кодирования в ячейки вспомогательных кодеров должны быть записаны нули. В процессе кодирования биты турбокода снимаются с выходов кодера в следующем порядке:

$$d_k^{(0)} = x_k, \quad (6)$$

$$d_k^{(1)} = z_k, \quad (7)$$

$$d_k^{(2)} = z'_k, \quad k=0, 1, 2, \dots, K-1, \quad (8)$$

где:

d_k - биты с выхода турбокодера,

x_1, x_2, \dots, x_K - биты, поступающие на вход кодера турбокода (систематические биты),

z_1, z_2, \dots, z_K - биты с выхода первого вспомогательного кодера,
 z'_1, z'_2, \dots, z'_K - биты с выхода второго вспомогательного кодера
(проверочные биты).

После того, как на вход турбокодера поступает последний информационный бит, к кодированному блоку добавляются окончательные биты. При этом сначала верхний переключатель турбокодера переключается в нижнее положение и, при тактировании только первого вспомогательного кодера, снимаются первые три окончательных бита. Далее, нижний переключатель турбокодера переключается в нижнее положение и, при тактировании только второго вспомогательного кодера, снимаются остальные три окончательных бита:

$$d_k^{(0)} = x_k, d_{k+1}^{(0)} = z_{k+1}, d_{k+2}^{(0)} = x'_k, d_{k+3}^{(0)} = z'_{k+1}, \quad (9)$$

$$d_k^{(1)} = z_k, d_{k+1}^{(1)} = x_{k+2}, d_{k+2}^{(1)} = z'_k, d_{k+3}^{(01)} = x'_{k+2}, \quad (10)$$

$$d_k^{(2)} = x_{k+1}, d_{k+1}^{(2)} = z_{k+2}, d_{k+2}^{(2)} = x'_{k+1}, d_{k+3}^{(2)} = z'_{k+2}. \quad (11)$$

Переключатель кодера турбокода осуществляет перестановку бит в следующем порядке. Если на его вход поступает последовательность бит c_0, c_1, \dots, c_{K-1} , то на выходе переключателя будет сформирована последовательность $c'_i = c_{\Pi(i)}$, $i=0, 1, \dots, K-1$.

Последовательность номеров $\Pi(i)$, в соответствии с которой изменяется порядок следования бит, формируется согласно формуле $\Pi(i) = (f_1 i + f_2 i^2) \bmod K$.

Параметры f_1, f_2 зависят от размера битовой последовательности K и определяются таблицей, приведенной в спецификации TS 36.212. [13]

Далее следует процедура выравнивания скоростей передачи данных. Суть этой процедуры заключается в том, чтобы исключить или повторить некоторые биты кодового блока, полученного на предыдущем шаге, и, таким образом, согласовать скорость передачи данных, требуемую транспортным каналом, и скорость передачи данных, которую может обеспечить физический канал. В результате канального кодирования образуется три потока данных. Эти битовые потоки вначале поступают на блочные переключатели, после этого объединяются

в блоке битового накопителя, после чего проводится процедура повторения или прореживания (рисунок 4).

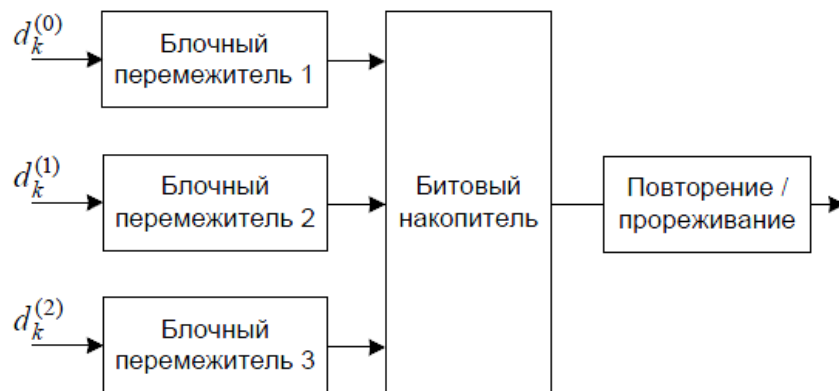


Рисунок 4 - Процедура выравнивания скоростей

Следующая процедура - скремблирование данных. На вход скремблера поступает блок бит $b(0), b(1), \dots, b(M_{\text{bit}}-1)$, где M_{bit} - размер блока. Суть процедуры скремблирования заключается в поэлементном суммировании по модулю 2 битов блока с битами псевдослучайной последовательности скремблирующего кода $c(i)$ согласно следующему алгоритму:

Set $i=0$

while $i < M_{\text{bit}}$

if $b(i)=x$ % Если i -тый бит является служебным

$\tilde{b}(i) = 1$

else

if $b(i)=y$ % Если i -тый бит - бит повторения

$\tilde{b}(i) = \tilde{b}(i - 1)$

else % Биты данных (биты кодового блока)

$\tilde{b}(i) = (b(i) + c(i)) \bmod 2$ % Выход скремлера $\tilde{b}(0), \tilde{b}(1), \dots, \tilde{b}(M_{\text{bit}}-1)$

end if;

$i=i+1$;

end while.

Скремблирующий код $c(n)$ вычисляется в результате поэлементного суммирования по модулю 2 двух m -последовательностей x_1 и x_2 :

$$c(n) = (x_1(n + 1600) + x_2(n + 1600)) \bmod 2. \quad (12)$$

Последовательности x_1 и x_2 вычисляются рекуррентно при задании инициализирующих элементов. Инициализирующие элементы последовательности x_1 имеют значения: $x_1(0)=1$, $x_1(n)=0$, $n=1, 2, \dots, 30$; последующие элементы вычисляются рекурсией:

$$x_1(n+31)=(x_1(n+3)+x_1(n)) \bmod 2, n=0, 1 \dots, M_{\text{bit}}-32. \quad (13)$$

Инициализирующие элементы последовательности x_2 определяются в виде коэффициентов двоичного представления целого числа:

$$c_{\text{init}} = \sum_{i=0}^{30} x_2(i)2^i. \quad (14)$$

Инициализирующее значение c_{init} в канале PDSCCH определяется следующим образом:

$$c_{\text{init}} = n_{\text{RNTI}}2^{14} + q2^{13} + \left\lfloor \frac{n_s}{2} \right\rfloor 2^9 + N_{\text{ID}}^{\text{cell}}, \quad (15)$$

где:

n_{RNTI} - временный идентификатор соединения,

q - номер слота в подкадре (0 или 1),

n_s -номер слота в кадре радиосигнала,

$N_{\text{ID}}^{\text{cell}}$ - идентификатор соты, который вычисляется как:

$$N_{\text{ID}}^{\text{cell}} = 3N_{\text{ID}}^{(1)} + N_{\text{ID}}^{(2)}, \quad (16)$$

где:

$N_{\text{ID}}^{(1)}=0, 1, \dots, 167$ - номер группы, которая предписывается каждой соте,

$N_{\text{ID}}^{(2)}=0, 1, 2$ - номер внутри группы.

Последующая рекурсия для x_2 вычисляется следующим образом:

$$x_2(n + 31) = (x_2(n + 3) + x_2(n + 2) + x_2(n + 1) + x_2(n)) \bmod 2. \quad (17)$$

Далее скремблированный блок данных $\tilde{b}(0), \tilde{b}(1), \dots, \tilde{b}(M_{\text{bit}}-1)$ поступает в блок модулятора, где осуществляется модуляция по одной из схем: QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Результатом модуляции является блок комплексных символов: $d^{(q)}(0), \dots, d^{(q)}(M_{\text{symb}}^{(q)} - 1)$ (M_{symb} - общее количество сформированных

модуляционных символов), над которым выполняется процедура размещения по уровням.

Суть процедуры размещения по уровням заключается в формировании v параллельных потоков комплексных символов, каждый из которых будет использоваться при формировании сигнала на отдельной антенне, причем количество антенн может быть меньше или равно количеству уровней. Результатом данной процедуры является $M_{\text{symb}}^{\text{layer}}$ векторов:

$$x(i) = [x^{(0)}(i) \dots x^{(v-1)}(i)]^T, i = 0, 1, \dots, M_{\text{symb}}^{\text{layer}} - 1. \quad (18)$$

В режиме работы с одной передающей антенной данная процедура не выполняется:

$$x^{(0)} = d^{(0)}(i), i = 0, 1, \dots, M_{\text{symb}} - 1. \quad (19)$$

После размещения по уровням данные проходят процедуры предварительного кодирования, после чего осуществляется формирования OFDMA символов параллельно для каждого антенного порта.

2.1.2 Передача служебной информации в нисходящем канале

2.1.2.1 Опорные и синхронизирующие сигналы

Для синхронизации и оценки смещения несущей в каждый ресурсный блок добавляются специальные опорные и синхронизирующие сигналы.

Опорные сигналы могут быть трех видов:

- опорный сигнал, характеризующий ячейку (cell-specific);
- сигнал, связанный с конкретным абонентским устройством;
- сигнал для специального широковещательного мультимедийного сервиса MBSFN.

Опорный сигнал служит для непосредственного определения условий в канале передачи (поскольку приемнику известно его месторасположение и исходная форма). На основе этих измерений можно определить реакцию канала

для остальных поднесущих и с помощью интерполяции восстановить их исходную форму.

Опорный cell-specific-сигнал должен присутствовать в каждом субкадре нисходящего канала. Форма сигнала определяется на основе псевдослучайной последовательности Голда (вариант m -последовательности), при инициализации которой используется идентификационный номер ячейки базовой станции (cell ID). Такой опорный сигнал равномерно распределен по ресурсным элементам. Так, при стандартной длине префикса он транслируется в 0-м и 4-м OFDM-символе, при расширенном CP – во время 0-го и 3-го OFDM-символа. В частотной области опорные сигналы передаются через каждые шесть поднесущих (рисунок 5).

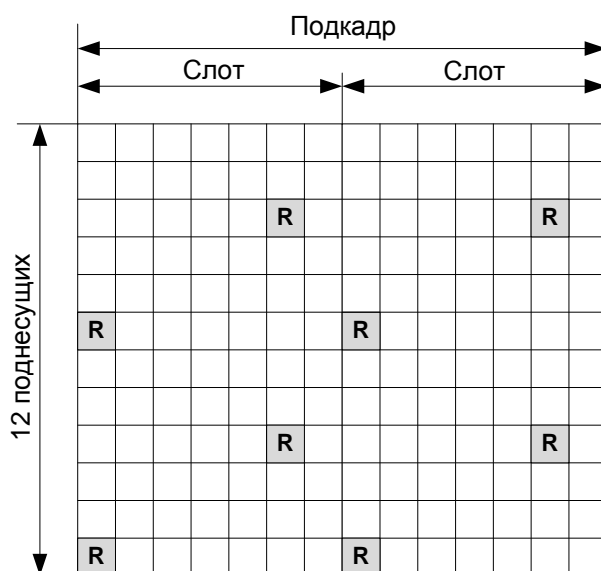


Рисунок 5 - Распределение опорных символов в ресурсной сетке

Помимо опорных сигналов, в нисходящем канале транслируются и синхронизирующие сигналы. Синхронизирующие сигналы также однозначно определяют Cell ID. В LTE принята иерархическая структура идентификации ячейки, как и в предшествующей ей технологии WCDMA. Предполагается, что на физическом уровне доступно 504 Cell ID. Они разбиты на 168 ID-групп, по 3 идентификатора в каждой. Номер группы $N1$ (0–167) и номер идентификатора в ней $N2$ (0–2) однозначно определяют ID ячейки.

Используется два синхросигнала – первичный и вторичный. Первичный синхросигнал представляет собой 62-элементную последовательность в частотном плане, задаваемую последовательностью Задова-Чу на основе идентификатора N2. Такая последовательность из 62 поднесущих, распределенных по ресурсной сетке симметрично относительно ее центральной частоты, передается в радиокadre типа 1 в последнем OFDM-символе слотов 0 и 10 (субкадры 0 и 5). Вторичный синхросигнал генерируется на основе номера ID-группы N1. Он передается в слотах 0 и 10 радиокadre типа 1 (пятый OFDM-символ при стандартном CP).

2.1.2.2 Сигналы каналов управления

В нисходящем канале осуществляется передача служебных сообщений в нескольких каналах управления:

- PBCH (Physical Broadcast Channel) - широковещательный канал, в котором передаются параметры сигнала RACH (запрос на предоставление выделенного канала пользовательским терминалом).

- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) - индикаторный канал управления форматом, который передает информацию о том, какое количество ресурсов в нисходящем направлении выделено для служебной информации.

- PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) - канал идентификации доставки пакетов.

- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) - канал управления, в котором передается информация о том какие ресурсы выделены пользовательскому терминалу. Сообщения канала PDCCH должны содержать следующую информацию:

- а) идентификаторы ресурсных блоков, выделенных данному пользователю. В нисходящем канале выделенные конкретному абонентскому устройству ресурсные блоки могут быть распределены по всему частотному

диапазону нисходящего канала. В этом случае передается информация о номерах выделенных для абонентского устройства ресурсных блоков. В случае, если выделяемые блоки расположены рядом друг с другом, в сообщении DCI (управляющие сообщения нисходящего канала) передается номер первого блока и общее количество выделенных ресурсных блоков.

б) Информация об используемой схеме модуляции и помехоустойчивого кодирования. Данная часть сообщает мобильной станции, какая схема модуляции используется для передачи данных канала PDSCH и размер транспортного блока. Зная размер транспортного блока, количество выделенных ресурсных блоков и схему модуляции, пользовательский терминал может определить используемую скорость помехоустойчивого кодера.

в) Идентификатор процесса, для которого требуется передача индикатора NI (идентификатор доставки пакета). Данный идентификатор необходим для предотвращения ситуации, при которой в пользовательском терминале может произойти объединение пакетов данных, относящихся к разным процессам. Для нисходящего и восходящего канала максимальное число процессов фиксировано и равно 8.

г) Индикатор новых данных, который показывает, является ли передаваемый пакет повторной передачей или содержит новые данные.

д) Номер повторной передачи. Если передаваемый пакет является повторной передачей, то данный параметр указывает, какой по счету раз осуществляется повторная передача. [14]

2.1.2.3 Обработка сигналов каналов управления

Для сообщений канала PDCCCH предусмотрен специальный метод пересчета контрольной суммы с учетом идентификатора пользователя. К транспортному блоку служебных данных производится добавление контрольной суммы, расчет которой для каждого транспортного блока производится с использованием полинома $g_{CRC16}(D)$ (4). В результате данной процедуры

формируется последовательность бит b_k ($k=0, 1, \dots, A+15$), где биты с номерами $0, 1, \dots, A-1$ соответствуют битам транспортного блока служебных данных, а биты с номерами $A, A + 1, \dots, A + 15$ являются проверочными. Пересчет контрольной суммы заключается в поэлементном сложении по модулю 2 проверочных бит с битами временного идентификатора пользователя:

$$c_k = (b_k + x_{\text{RNTI},k-A}) \bmod 2, k = A, A + 1, A + 2, \dots, A + 15, \quad (20)$$

где $x_{\text{RNTI},0}$ - старший бит временного идентификатора,

$x_{\text{RNTI},15}$ — младший бит временного идентификатора.

Схема кодирования данных канала PDSCH представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 - Схема кодирования данных канала PDSCH

Далее над полученной битовой последовательностью проводятся процедуры сверточного помехоустойчивого кодирования и выравнивания скоростей передачи данных. Модуляция данных в канале PDSCH осуществляется по схеме QPSK.

Данные канала PDSCH проходят процедуру сверточного помехоустойчивого кодирования, затем осуществляется их скремблирование с параметром $c_{\text{init}} = N_{\text{ID}}^{\text{cell}}$ (14), после чего проводится QPSK модуляция и размещение данных по ресурсным элементам.

Перед осуществлением передачи данные канала PDSCH проходят процедуру скремблирования, после чего осуществляется модуляция. Сформированные символы размещаются по группам ресурсных элементов.

Над сообщениями канала PDSCH производится модуляция по схеме BPSK, после чего они размещаются по ресурсным элементам.

К перечисленным каналам применимы следующие виды модуляции, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Виды модуляции для каналов управления

Тип канала	Вид модуляции
PHICH	BPSK
PCFICH	QPSK
PBCH	
PDCCH	

2.2 Формирование модели нисходящего канала

Модель нисходящего канала разработана с учетом алгоритмов формирования сигнала для передачи в нисходящем канале.

2.2.1 Формирование сигналов служебного назначения

Формирование сигналов каналов управления представлено на рисунке 7.

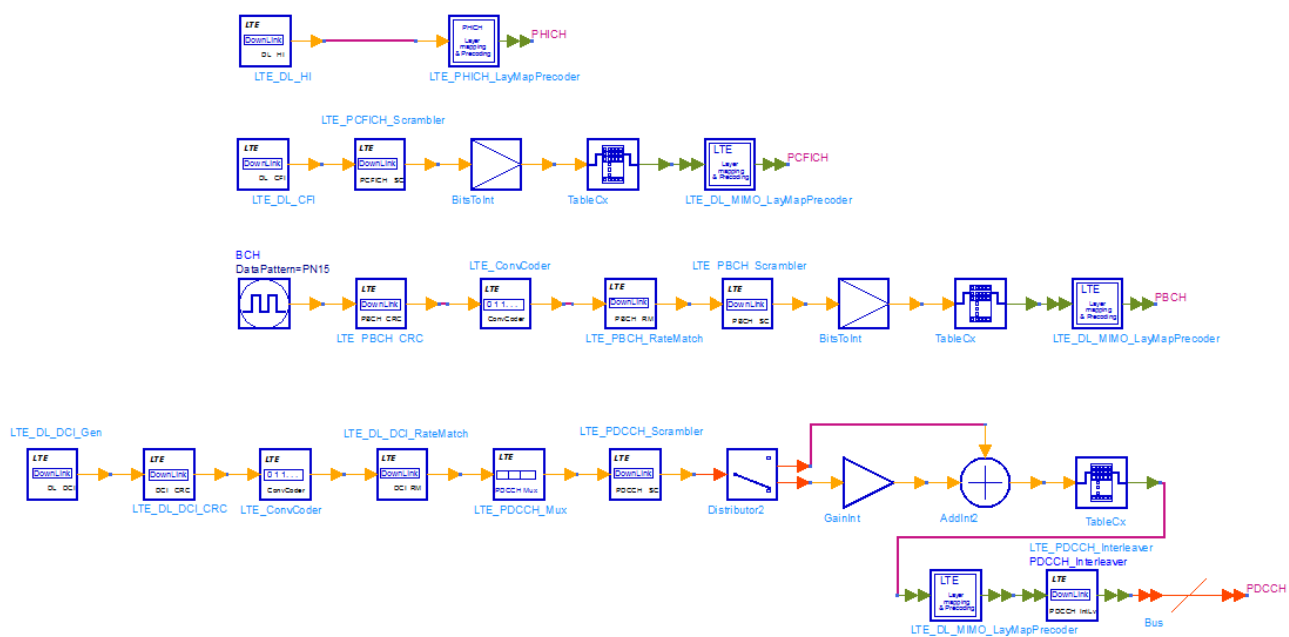


Рисунок 7 - Формирование сигналов каналов управления

В формировании каналов управления участвуют блоки:

- при формировании данных канала PHICH:
 - 1) LTE_DL_HI - генерация сигналов PHICH;
 - 2) LTE_PHICH_LayMapPrecoder - предварительное кодирование.
- При формировании данных канала PCFICH:
 - 1) LTE_DL_CFI - генерация символов PCFICH;
 - 2) LTE_PCFICH_Scrambler - процедура скремблирования;
 - 3) TableCx, LTE_DL_MIMO_LayMapPrecoder .
- При формировании данных канала PBCH:
 - 1) DataPattern - генерация битов для канала PBCH;
 - 2) LTE_PBCH_CRC - добавление контрольных сумм;
 - 3) LTE_ConvCoder - сверточное кодирование;
 - 4) LTE_PBCH_RateMatch - контроль скорости;
 - 5) LTE_PBCH_Scrambler - процедура скремблирования;
 - 6) TableCx , LTE_DL_MIMO_LayMapPrecoder.
- При формировании данных канала PDCCH:
 - 1) LTE_DL_DCI_Gen - генерация символов канала PDCCH;
 - 2) LTE_PDCCH_CRC;
 - 3) LTE_ConvCoder;
 - 4) LTE_PDCCH_Mux;
 - 5) LTE_PBCH_Scrambler;
 - 6) TableCx, LTE_DL_MIMO_LayMapPrecoder;
 - 7) LTE_PDCCH_Interleaver - перемежение символов PDCCH.

Для формирования опорных и синхронизирующих сигналов в модели используются следующие блоки, представленные на рисунке 8:

- LTE_DL_Pilot - генератор опорного сигнала;
- LTE_PSCH - генератор первичного синхросигнала;

- LTE_SSCH - генерация вторичного синхросигнала.

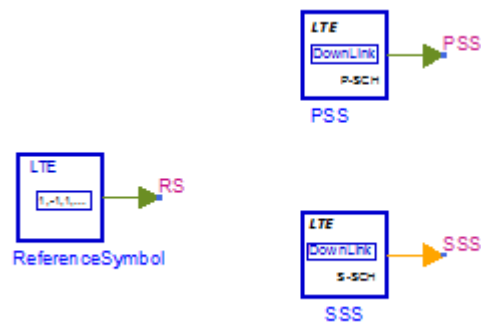


Рисунок 8 Формирование опорных и синхронизирующих сигналов

2.2.2 Канальное кодирование, формирование модуляционных символов, распределение по ресурсным элементам

Процесс формирования информационного сигнала, передаваемого в канале PDSCH в модели представлен на рисунке 9.

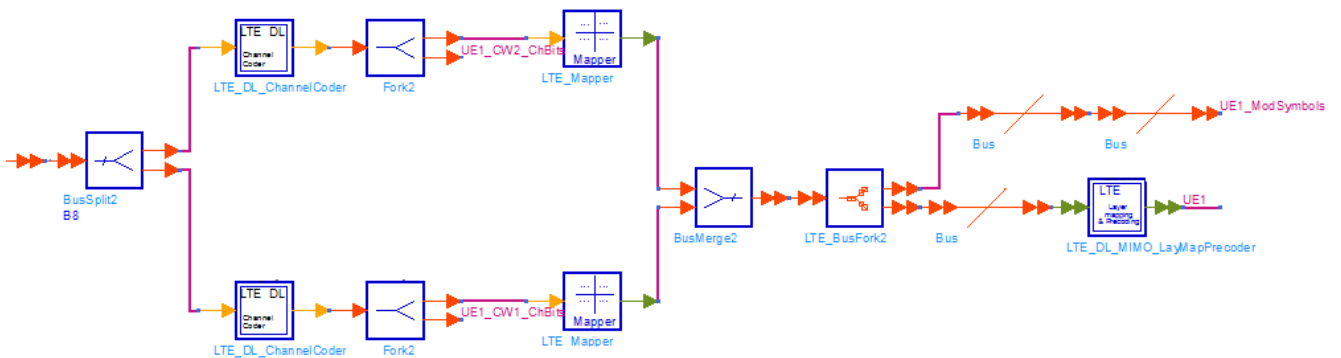


Рисунок 9 - Формирования сигнала в нисходящем канале

Процедуры канального кодирования, формирования модуляционных символов и распределение сигналов по ресурсным элементам осуществляются в следующих блоках:

- LTE DL ChannelCoder - осуществляет процедуру канального кодирования в нисходящем канале. Включает в себя элементы:

- 1) LTE_CRC Encoder - добавление контрольных сумм;
 - 2) LTE_CodeBlkSeg - разбиение сигнала на кодовые блоки;
 - 3) LTE_TurboCoder - турбо-кодер;
 - 4) LTE_RateMatch;
 - 5) LTE_Scrambler.
- LTE_Mapper - формирование модуляционных символов.
 - LTE_DL_MIMO_LayMapPrecoder - распределение сигнала по уровням (антенным портам) и распределение сигнала по ресурсным элементам (предварительное кодирование).

2.2.3 Синтез OFDM сигнала

Процесс формирования OFDM сигнала представлен на рисунке 10.

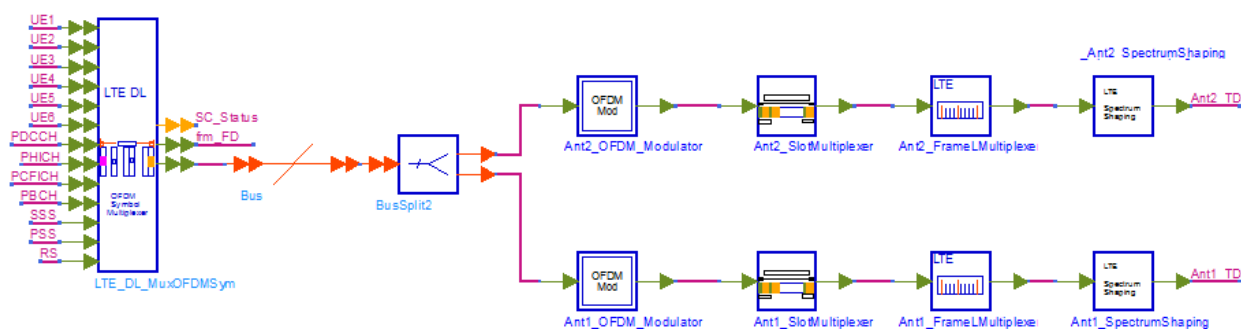


Рисунок 10 - Формирование OFDM сигнала

- LTE_DL_MuxOFDMSym - формирование OFDM символа с учетом пришедшего на вход сигнала (UE1), опорного и синхронизирующих сигналов (RS, PSS, SSS) и сигналов управления (PHICH, PCFICH, PBCH, PDCCH).
- LTE_DL_OFDM_Modulator - блок OFDM - модуляции. Включает в себя блок LTE_FFT, работающий в режиме обратного быстрого преобразования Фурье.

- LTE_DL_MuxSlot - добавление циклических префиксов между OFDM - символами.
- LTE_DL_MuxFrame - мультиплексирование 20 подкадров в одном радиокадре и вставление интервала простоя (IdleInterval) между двумя последовательными радиокадрами.
- LTE_SpecShaping - сглаживание конечного спектра сигнала для его дальнейшей передачи.

2.2.4 Канал передач

Канал передачи в представленной схеме задан блоком LTE_MIMO_Channel. Использование указанного блока в качестве модели канала передачи позволяет проводить анализ при изменении ряда параметров:

- скорость движения абонента;
- конфигурация используемой схемы MIMO (возможны варианты 1x2, 2x2, 4x2);
- степень корреляции антенн при использовании технологии MIMO;
- многолучевая модель распространения сигнала. Канал LTE_MIMO_Channel позволяет задавать различные условия распространения сигнала с указанием количества путей распространения, временной задержки и относительной мощности для каждого пути. Однако радиоспецификации LTE определяют специфический набор условий распространения сигнала, который должен использоваться при тестировании (таблицы 2 - 4).

Таблица 2 - Параметры условий распространения для расширенной А-модели пешехода

Временная задержка, нс	Коэффициент затухания, дБ
0	0,0

30	-1,0
70	-2,0
90	-3,0
110	-8,0
190	-17,2
410	-20,8

Таблица 3 - Параметры условий распространения для расширенной А-модели при движении в автомобиле

Временная задержка, нс	Коэффициент затухания, дБ
0	0,0
30	-1,5
150	-1,4
310	-3,6
370	-0,6
710	-9,1
1090	-7,0
1730	-12,0
2510	-16,9

Таблица 4 - Параметры условий распространения для расширенной модели для типовой городской застройки

Временная задержка, нс	Коэффициент затухания, дБ
0	-1,0
50	-1,0
120	-1,0
200	0,0
230	0,0

500	0,0
1600	-3,0
2300	-5,0
5000	-7,0

2.3 Результаты моделирования нисходящего канала

В ходе анализа модели нисходящего канала был получен спектр сигнала, сформированный при использовании технологии OFDMA (рисунок 11). Для проведения анализа использовался компонент SpectrumAnalyzer.

Для всех экспериментов выбрана несущая частота 2,5 ГГц.

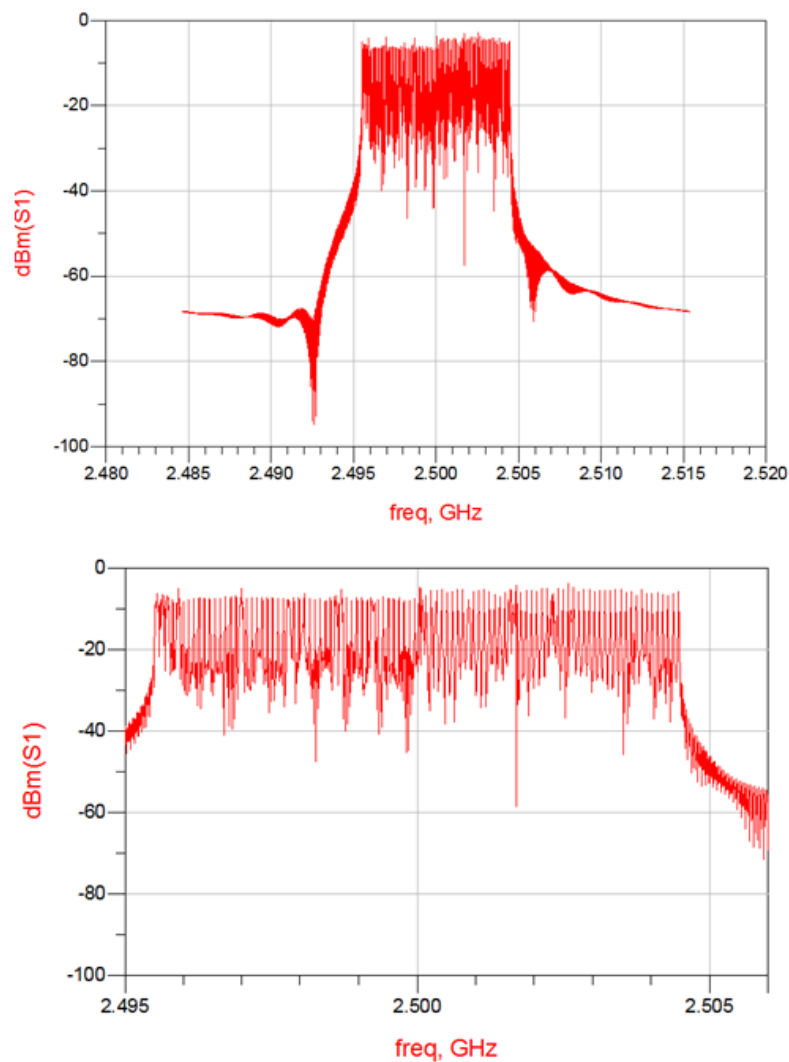


Рисунок 11 - Спектр сигнала в нисходящем канале

В ходе анализа исследовалось влияние видов модуляции на величину битовой (BER) и пакетной (FER) ошибок (таблица 7). При этом значение пакетной ошибки рассчитывается следующим образом:

$$FER = 1 - (1 - BER)^{\text{BitsPerSubFrame}}, \quad (21)$$

где BitsPerSubFrame - количество бит в подкадре.

Результаты анализа показывают, что наилучший вид модуляции, с точки зрения помехоустойчивости, - QPSK. На основе полученных результатов для дальнейших исследований была выбрана QPSK модуляция при отношении сигнал/шум 4 дБ. При таких параметрах уровень битовой ошибки равен $3,8 \cdot 10^{-4}$. Схожая степень ошибки при использовании других видов модуляции достигается

при больших уровнях отношения сигнал/шум: для 16-QAM - 10 дБ, для 64-QAM - 13 дБ (рисунок 12).

Таблица 5 - Влияние методов модуляции на BER и FER

Вид модуляции	SNR, дБ	BER	FER
QPSK	1	0,006	0,216
	2	0,003	0,076
	3	0,002	0,053
	4	3,837e-4	0,024
	5	1,516e-5	0,002
	6	3,237e-7	0,000
	7	0,000	0,000
	8	0,000	0,000
16-QAM	1	0,200	0,998
	2	0,172	0,989
	3	0,145	0,986
	4	0,096	0,976
	5	0,004	0,286
	6	0,003	0,097
	7	0,001	0,066
	8	0,001	0,056
64 - QAM	1	0,303	0,998
	2	0,279	0,998
	3	0,261	0,998
	4	0,235	0,998
	5	0,217	0,998
	6	0,187	0,989
	7	0,133	0,983
	8	0,050	0,972

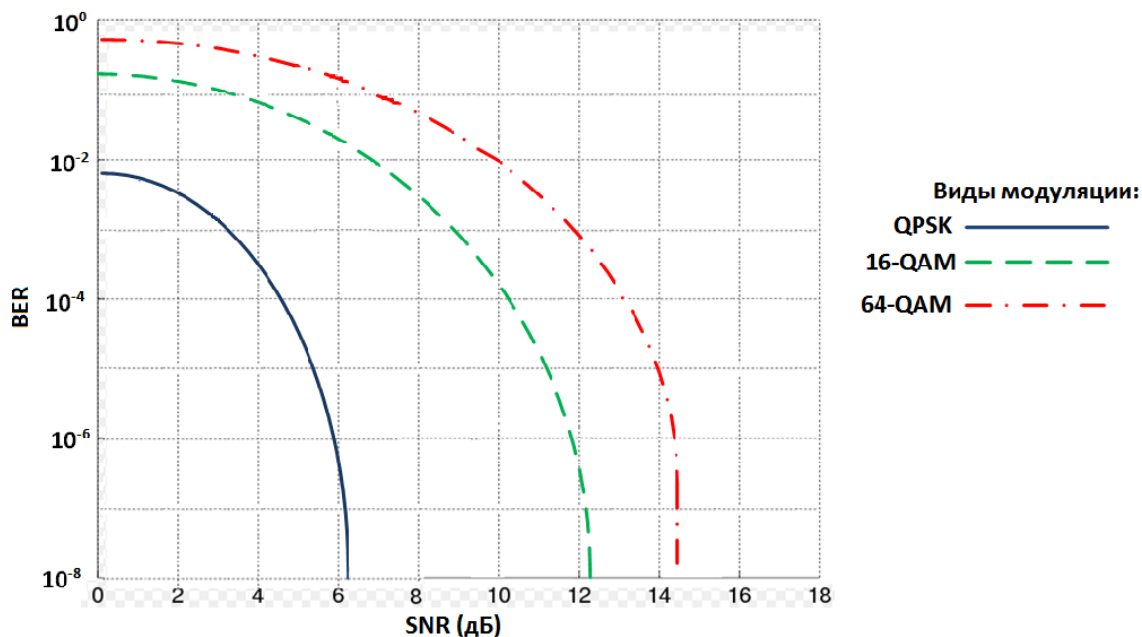


Рисунок 12 - Зависимость значения битовой ошибки от отношения сигнал/шум при различных видах модуляции

Также проведена оценка зависимости значений BER и FER от используемой полосы (таблица 6). Результаты анализа показывают, что при увеличении ширины канала связи, значения битовой и пакетной ошибок несущественно уменьшаются. Однако для дальнейшего анализа выбрана полоса 10 МГц, так как именно эта полоса определена как минимальный частотный ресурс на одного оператора в плане использования полос радиочастот в рамках развития перспективных радиотехнологий в Российской Федерации.

Таблица 6 - Зависимость значений BER и FER от ширины канала

Полоса, МГц	BER	FER
5	4,157e-4	0,041
10	3,837e-4	0,024
15	1,875e-4	0,010
20	1,871e-4	0,013

В ходе анализа схемы проведен анализ влияния степени корреляции антенн (таблица 8) и скорости движения абонента на значения битовой и пакетной ошибок (таблица 9).

Таблица 7 - Зависимость значений BER и FER от степени корреляции антенн

Степень корреляции антенн	BER	FER
Низкая	2,548e-5	0,002
Средняя	3,837e-4	0,024
Высокая	0,002	0,042

Таблица 8 - Зависимость значений BER и FER от скорости движения абонента

Скорость, км/ч	BER	FER
2	3,837e-4	0,024
60	0,010	0,235
120	0,041	0,750
300	0,095	0,896

Результаты анализа, представленные в таблице 7 показывают, что при высокой степени корреляции антенн значения битовой и пакетной ошибок существенно возрастают. Дальнейший анализ показал, что при высокой степени корреляции антенн необходимо увеличивать отношение сигнал/шум на 2 дБ. Результаты, представленные в таблице 8 показывают, что при увеличении скорости движения абонента значения BER и FER существенно увеличиваются.

Также в ходе анализа проведено исследование влияния условий распространения сигнала на значения BER и FER. Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Зависимость значений BER и FER от условий распространения сигнала

Модель условий распространения	BER	FER
Расширенная А-модель пешехода (ЕРА)	4,224e-4	0,005
Расширенная А-модель при движении в автомобиле (ЕVА)	3,837e-4	0,024
Расширенная модель для типовой городской застройки (ЕТU)	2,852e-4	0,016

При прочих равных параметрах передачи наибольшие значения битовой и пакетной ошибок получены для модели распространения EVA. Это вызвано увеличением количества путей распространения сигнала, значения среднеквадратичного отклонения задержки, а также максимально возможного коэффициента затухания (таблицы 2 - 4). Для решения этой проблемы возможно использование расширенного циклического префикса.

В работе также проведено исследование устойчивости сформированной модели приема-передачи к узкополосным помехам, которая свойственна широкополосным сигналам. Для этого в схему добавлен источник сигнала N_Tones (рисунок 13), генерирующий узкополосный сигнал на несущей частоте 2,5 ГГц (рисунок 14).

В ходе эксперимента установлено, что введение узкополосной помехи мощностью от 0 до 35 дБм не влияет на значения битовой и пакетной ошибок, что свидетельствует об устойчивости схемы к узкополосным помехам.

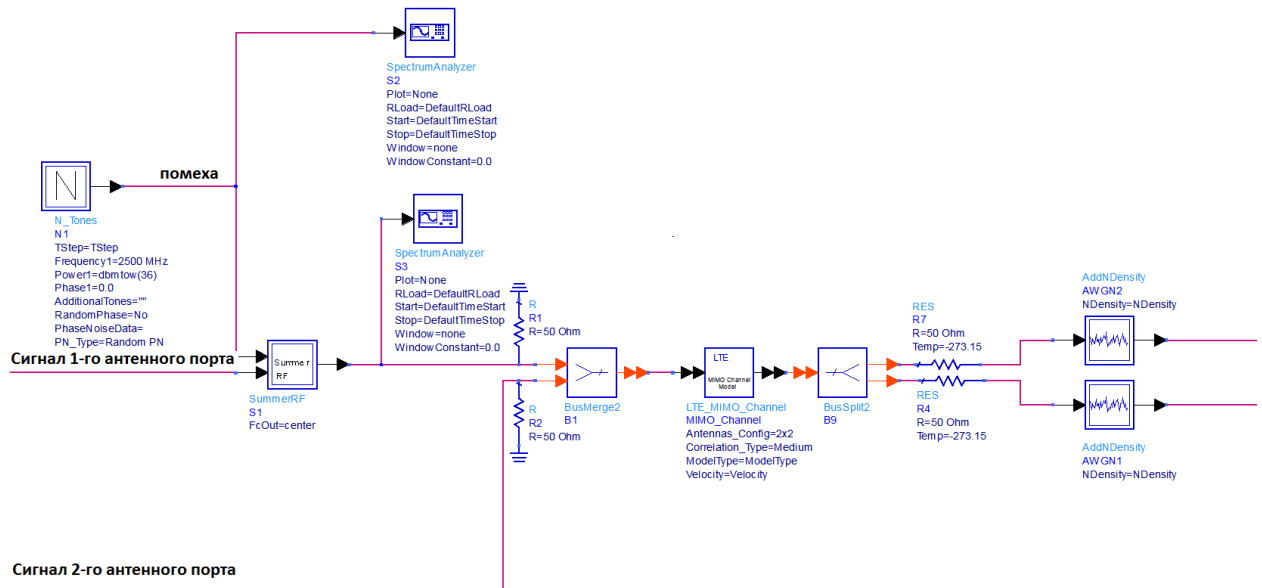


Рисунок 13 - Введение источника узкополосной помехи в модель нисходящего канала

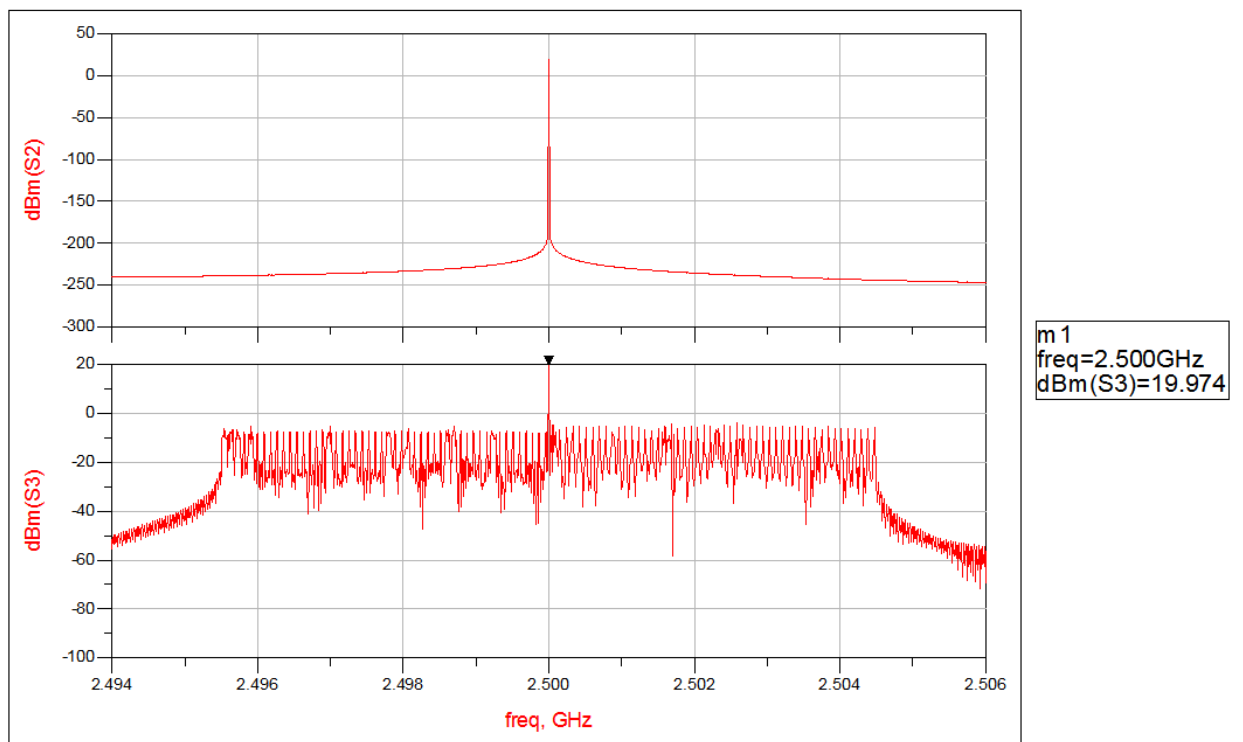


Рисунок 14 - Спектр сигнала в нисходящем канале при добавлении узкополосной помехи

3. Разработка модели восходящего канала стандарта LTE

3.1 Формирование сигнала в восходящем канале

3.1.1 Передача пользовательских данных в восходящем канале

Процесс обработки пользовательских данных для передачи в восходящем канале схож с нисходящим каналом (рисунок 15). Он включает процедуры канального кодирования, скремблирования и формирования модуляционных символов. Однако для дальнейшей передачи, в отличие от нисходящего канала, в восходящем используется технология SC-FDMA, что связано со значительно меньшей допустимой мощностью излучения.

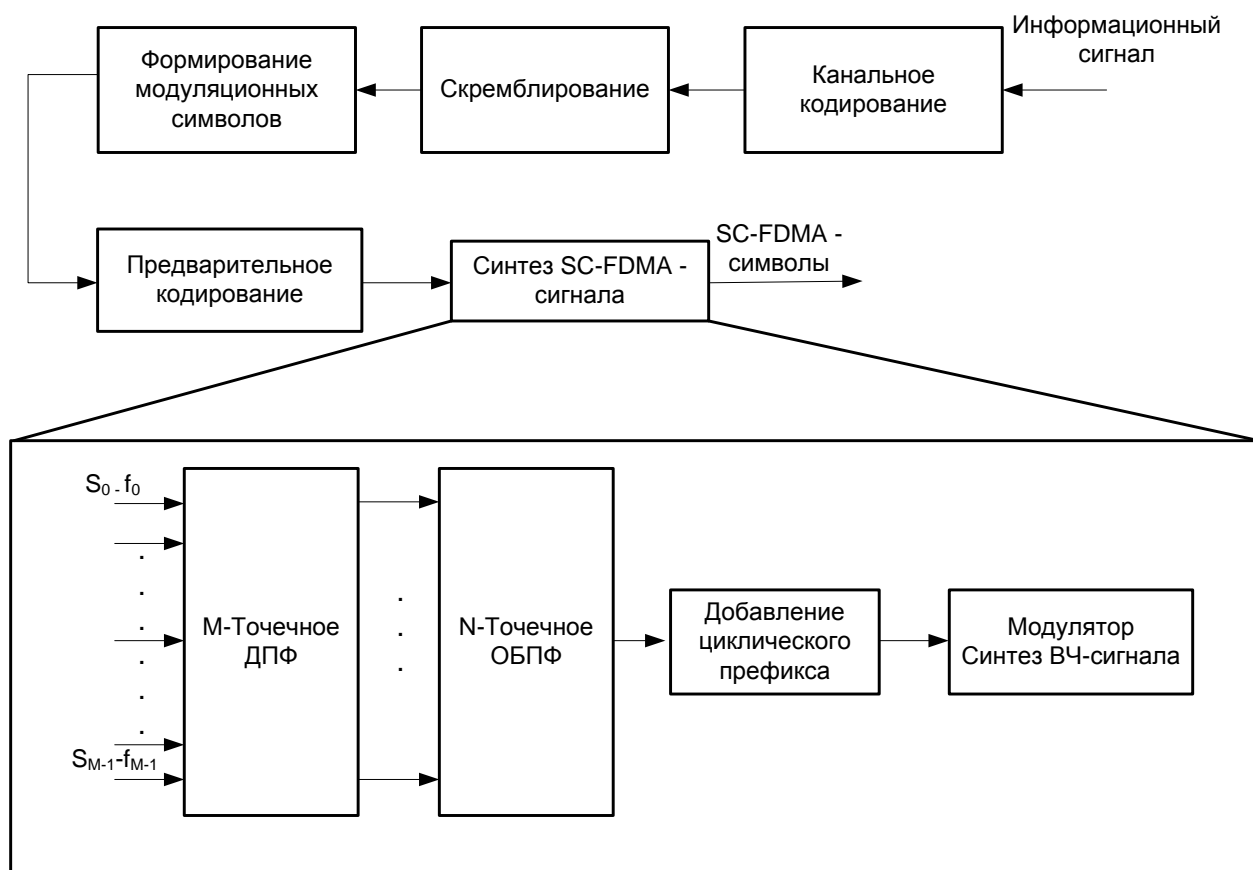


Рисунок 15 - Схема обработки информационного сигнала в восходящем канале стандарта LTE

Процедуры канального кодирования, скремблирования и формирования модуляционных символов выполняются по тем же алгоритмам, что и в нисходящем канале, однако для расчета элемента x_2 (14) скремблирующего кода используется специализированное инициализирующее значение:

$$c_{\text{init}} = n_{\text{RTN1}} 2^{14} + \left\lfloor \frac{n_s}{2} \right\rfloor 2^9 + N_{\text{ID}}^{\text{cell}}. \quad (22)$$

Результатом процедуры формирования модуляционных символов является последовательность комплексных модуляционных символов $d(0), d(1), \dots, d(M_{\text{symb}}-1)$. В результате процедуры предварительного кодирования данная последовательность разбивается на $M_{\text{symb}}/M_{\text{SC}}^{\text{PUSCH}}$ подпоследовательностей, каждая из которых будет размещена в одном SC-FDMA-символе, при этом $M_{\text{SC}}^{\text{PUSCH}}$ — количество информационных поднесущих, доступных для канала PUSCH. Итогом предварительного кодирования является комплексная последовательность $z(0), z(1), \dots, z(M_{\text{symb}}-1)$.

Количество поднесущих частот $M_{\text{SC}}^{\text{PUSCH}}$, выделенных каналу PUSCH, можно выразить следующим образом: $M_{\text{SC}}^{\text{PUSCH}} = M_{\text{RB}}^{\text{PUSCH}} N_{\text{SC}}^{\text{RB}}$, где $N_{\text{SC}}^{\text{RB}}$ — количество поднесущих в одном ресурсном блоке (равное 12), а $M_{\text{RB}}^{\text{PUSCH}}$ — количество ресурсных блоков, выделенных каналу PUSCH.

Далее производится умножение символов $z(0), z(1), \dots, z(M_{\text{symb}}-1)$ на амплитудный масштабирующий множитель β_{PUSCH} с целью соответствия излучаемой мощности P_{PUSCH} . Требования, по которым выбирается уровень P_{PUSCH} предполагают учёт достаточно большого числа параметров: конфигурируемый уровень мощности пользовательского терминала, полоса частот выделяемых ресурсных блоков, энергетические параметры, используемые в данной соте и другие.

Модуляционные символы, сгруппированные в блоки по M символов (субсимволы SC-FDMA), подвергаются M -точечному дискретному преобразованию Фурье. Затем с помощью стандартной процедуры обратного N -точечного преобразования Фурье (N - количество возможных для передачи поднесущих) синтезируется сигнал, соответствующий независимой модуляции

каждой поднесущей, добавляется циклический префикс и генерируется выходной ВЧ-сигнал. На стороне приема все процедуры выполняются в обратном порядке.

3.1.2 Передача служебной информации в восходящем канале

3.1.2.1 Опорные сигналы

В восходящем направлении необходимо передавать заранее известные базовой станции последовательности информационных символов для обеспечения условий когерентного приема сигналов. Пилотные сигналы передаются в физическом восходящем управляющем канале PUCCH и в физическом восходящем совместном канале PUSCH в качестве так называемых демодулирующих пилотных сигналов (Demodulation Reference Signals, DMRS), также возможна передача зондирующих пилотных сигналов (Sounding Reference Signals, SRS).

Демодулирующие пилотные сигналы необходимы для оценки передаточной характеристики канала, а также для реализации когерентного приема. Такой пилотный сигнал должен занимать в частотной области весь диапазон, доступный данному абоненту для передачи сигнала восходящего канала.

Для формирования демодулирующего пилотного сигнала пользовательскому терминалу необходимо определить следующие параметры:

- номер группы (этот параметр определяется сотой, которая обслуживает данного пользователя);
- номер последовательности в пределах данной группы (этот параметр также определяется сотой);
- циклический сдвиг выбранной последовательности, с которым будет формироваться сигнал DMRS (один из 12 возможных циклических сдвигов определяется как сотой, так и пользовательским оборудованием);
- количество элементов последовательности, которые будут размещены по соответствующим поднесущим.

Зондирующие пилотные сигналы (сигналы SRS) необходимы для оценки качества канала базовой станцией во всей полосе частот восходящего канала, даже если передача канала PUSCH занимает не весь выделенный частотный диапазон или вовсе отсутствует. Базовая станция принимает сигнал SRS, производит оценку качества канала и использует информацию о качестве канала для оптимального решения о выделении частотного ресурса абоненту.

При передаче сигнала SRS используется режим распределенной по символу передачи, при котором символы пилотной последовательности помещаются на каждую вторую поднесущую SC-FDMA символа. Для зондирующего сигнала используются такие же пилотные последовательности, что и для демодулирующего пилотного сигнала. Длина пилотной SRS-последовательности всегда кратна 24, таким образом, диапазон сигнала SRS всегда кратен диапазону четырех ресурсных блоков.

Для разделения сигналов SRS в системе LTE предусмотрены следующие методы:

- разделение абонентов по циклическому сдвигу. Для сигналов SRS возможно 8 значений циклического сдвига.
- Временное разделение, при котором сигналы SRS различных пользователей размещаются в конце разных подкадров радиосигнала.

3.1.2.2 Служебная информация физических каналов

В восходящем направлении передача служебной информации осуществляется в нескольких каналах:

а) PRACH (Physical Random Access Channel)- канал произвольного доступа, который служит для запроса начальной инициализации в сети, при хендвере, при выходе из режима ожидания в активный режим.

б) PUCCH (Physical Uplink Control Channel) - управляющий канал, который может иметь несколько конфигураций:

1) формат 1 (условный) – передача информации, устанавливающей сам факт наличия или отсутствия передачи информации по каналу PUSCH. Условным показателем такого формата является равенство единице модуляционного символа $d(0)$.

2) Формат 2 - используется для передачи блоков служебной информации длительностью 20 - 22 бит.

В канале PUSCH может передаваться следующая информация:

1) идентификаторы ресурсных блоков, выделенных пользователю в совместном канале PUSCH;

2) информация об используемой схеме модуляции и схеме помехоустойчивого кодирования;

3) индикатор новых данных;

4) информация о мощности сигнала канала PUSCH, для которого выделяются частотно-временные ресурсы;

5) циклический сдвиг, который следует использовать при формировании последовательности демодулирующего пилотного сигнала.

6) индикатор качества канала (CQI) или запрос CQI.

в) PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) - канал общего пользования.

В канале PUSCH передаются пользовательские данные, а также запрос CQI, информация о доставке пакетов (ACK/NACK), индикатор класса передаваемых данных (RI).

Канал общего пользования и управляющий канал никогда не транслируются одновременно одним абонентским устройством. Для передачи управляющего канала используется один ресурсный блок в каждом из слотов одного субкадра.

3.1.2.3 Обработка служебной информации физических каналов

В канале PUSCH пользовательские и служебные данные (ACK/ NACK, индикаторы качества CQI, индикаторы класса RI (Rank Indicator)) проходят

процедуры кодирования и модуляции, причем данные процедуры различны для каждого вида данных, затем осуществляется процедура их мультиплексирования в блок SC-FDMA-символов (рисунок 16).

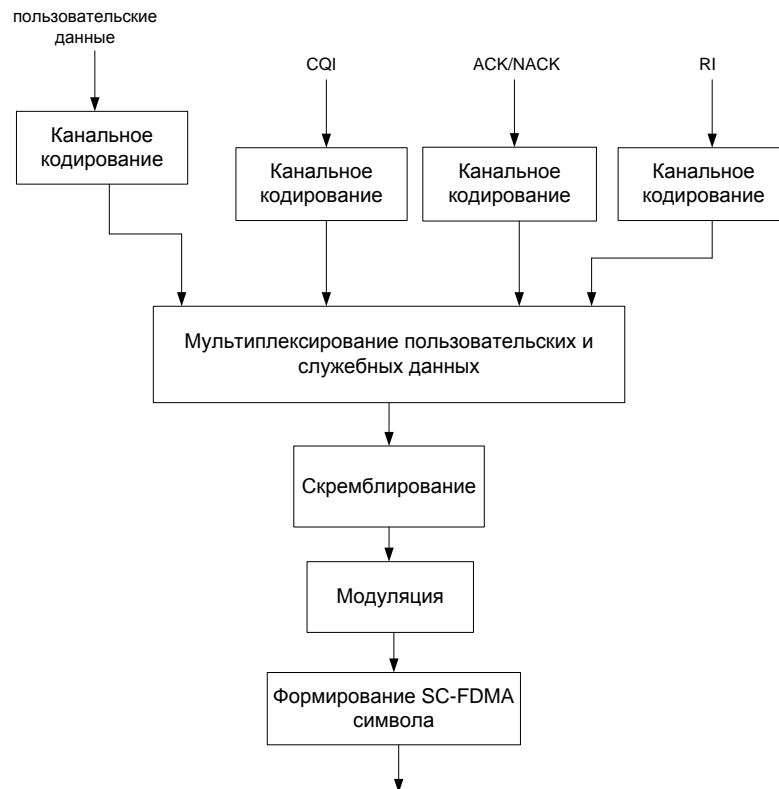


Рисунок 16 - Мультиплексирование данных канала PUSCH

При передаче сигналов управления в канале PUSCH используются следующие способы кодирования:

- кодирование повторением (используется для однобитовых сообщений ACK/ NACK);
- симплексное кодирование (2-битовые сообщения ACK/ NACK, RI);
- $(32, N)$ - блочные коды Рида — Маллера (сообщения CQI размером меньше 11 бит);
- свёрточные коды со скоростью $1/3$ (сообщения CQI/PMI размером больше или равные 11 бит).

Сигнал канала PUSCH занимает в частотной области один ресурсный блок (12 поднесущих). Сигналы рассматриваемого физического канала всегда занимают ресурсные блоки, расположенные “на краях” общего диапазона частот,

выделенного системе. При переходе к новому слоту радиосигнала расположение ресурсного блока может изменяться, что означает возможность осуществления частотного скачка. При этом ресурсные блоки канала PUCCH в соседних слотах располагаются симметрично относительно центральной частоты диапазона.

Сигналы физического канала PUCCH, принадлежащие различным абонентам, могут разделяться по частоте или кодом, когда сигналы различных абонентов находятся в одном ресурсном блоке и разделены ортогональными последовательностями.

Кодовое разделение сигналов абонентов может осуществляться двумя способами:

- использованием последовательностей с постоянной амплитудой и нулевой автокорреляцией (Constant Amplitude Zero Autocorrelation Codes, CAZAC-последовательности) с различными циклическими сдвигами;
- использованием ортогональных последовательностей Уолша.

В канале PUCCH используются CAZAC-последовательности длиной 12 элементов (каждый элемент помещается на свою поднесущую), которые модулируются по схеме QPSK модуляции.

3.2 Формирование модели восходящего канала

3.2.1 Формирование сигналов служебного назначения

Формирование опорного сигнала и сигналов каналов PRACH, PUCCH представлено на рисунке 17.

- Формирование канала PUCCH:
 - 1) DattaPattern, LTE_UL_PUCCH - генерация сигналов PUCCH.
- Формирование канала PRACH:
 - 2) LTE_RACH- генерация символов RACH;
 - 3) GainCx - усиление комплексного сигнала.

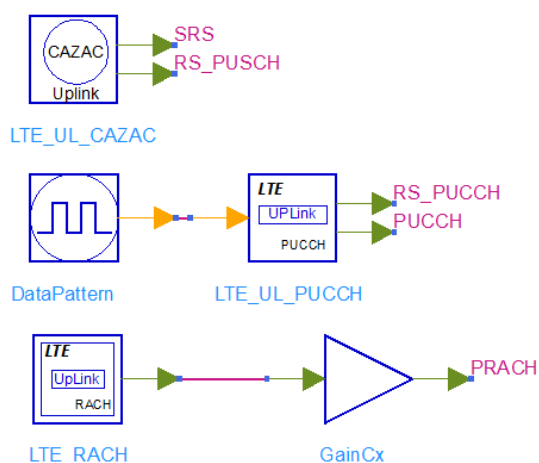


Рисунок 17 - Формирование опорного сигнала и сигналов каналов PRACH, PUCCH

3.2.2 Канальное кодирование и формирование модуляционных символов

Процесс формирования сигнала, передаваемого в канале PUSCH в модели представлен на рисунке 18.

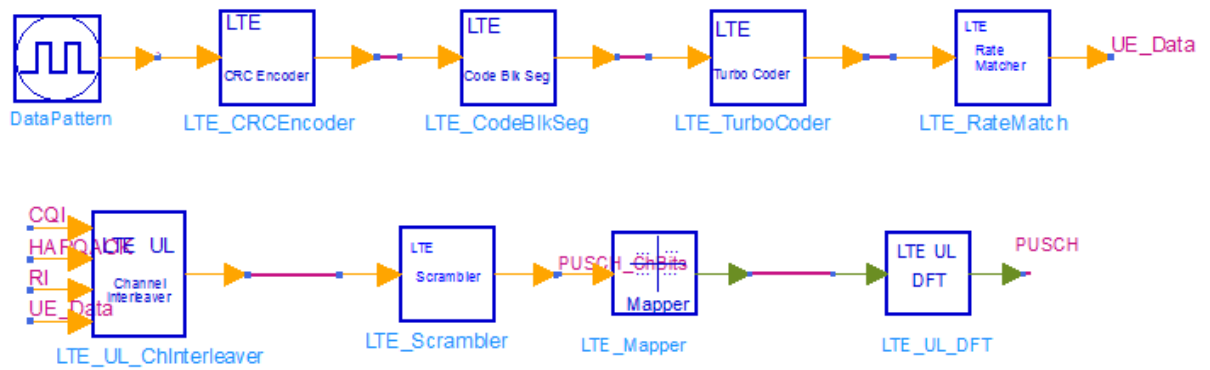


Рисунок 18 - Формирования сигнала в восходящем канале

Процедуры канального кодирования и формирования модуляционных символов осуществляются в следующих блоках:

- DattaPattern, LTE_CRCEncoder, LTECodeBlkSeg, LTE_TurboCoder, LTE_RateMatch, LTE_UL_ChInterleaver, LTE_Scrambler - выполнение канального кодирования;
- LTE_Mapper - формирование модуляционных символов;
- LTE_UL_DFT - выполнение дискретного преобразования Фурье.

3.2.3 Синтез SC-FDMA сигнала

Процесс формирования SC-FDMA сигнала представлен на рисунке 19.

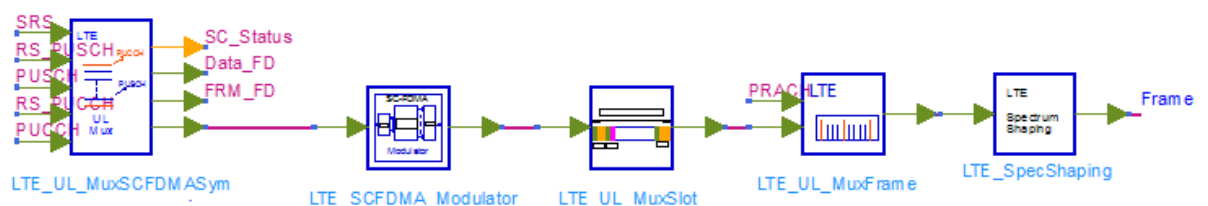


Рисунок 19 - Формирование SC-FDMA сигнала

- LTE_UL_MuxSCFDMA Sym - формирование SCFDMA символа с учетом пришедших на вход сигналов каналов PUSCH, PRACH, PUCCH и опорных сигналов.

- LTE_SCFDMA_Modulator.
- LTE_UL_MuxSlot - добавление циклических префиксов.
- LTE_UL_MuxFrame - мультиплексирование 20 подкадров в одном радиокадре и вставление интервала "простоя" (IdleInterval) между двумя последовательными радиокадрами.
- LTE_SpecShaping - сглаживание конечного спектра сигнала для его дальнейшей передачи.

3.2.4 Канал передачи

Канал передачи в представленной схеме задан блоком LTE_Channel_ITU. Этот блок является моделью передачи радиосигнала от мобильной станции к базовой. Такая модель позволяет изменять среду распространения сигнала, дальность расположения абонентского терминала от базовой станции, потери в канале, скорость движения абонента.

3.3 Результаты моделирование восходящего канала

Спектр сигнала, передаваемого в восходящем канале представлен на рисунке 20.

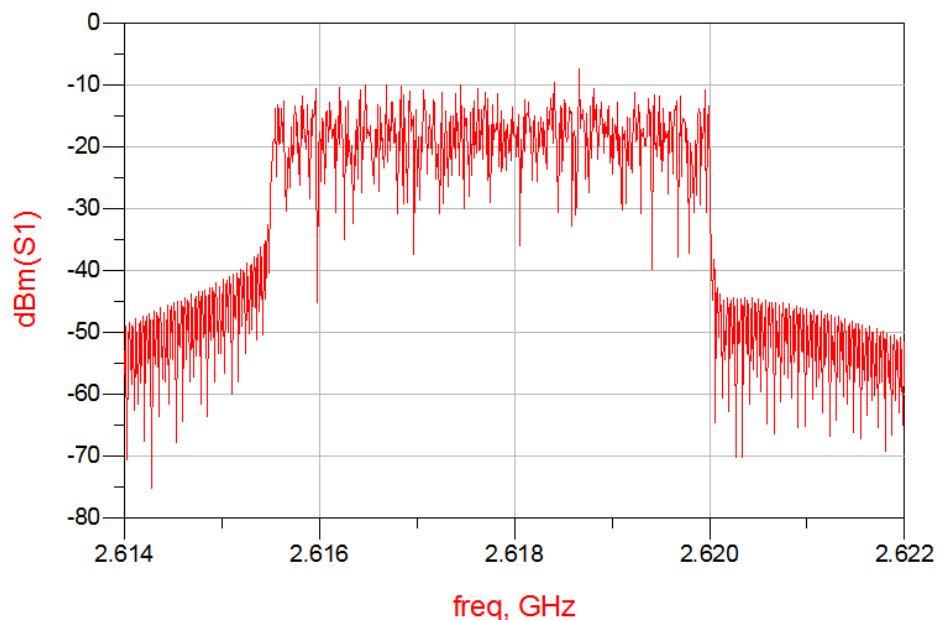


Рисунок 20 - Спектр сигнала в восходящем канале

При анализе модели восходящего канала были исследованы зависимости значений битовой и пакетной ошибок при изменении ряда параметров:

- вид модуляции (таблица 10);
- ширина канала (таблица 11);
- скорость движения абонента (таблица 12);
- условия распространения сигнала (таблица 13).

Результаты анализа аналогичны результатам, полученным для нисходящего канала.

Канал LTE_Channel_ITU также позволяет исследовать влияние расстояния между абонентским терминалом и базовой станцией на параметры сигнала. При этом возможно изменение расстояния от 200 до 5000 метров. Согласно требованиям при передачи на таком расстоянии не должно наблюдаться существенных изменений [14], что в ходе анализа схемы подтвердилось.

Таблица 10 - Зависимость значений BER и FER от вида модуляции

Вид модуляции	SNR, дБ	BER	FER
QPSK	1	0,019	0,250
	2	0,015	0,226
	3	0,003	0,061
	4	0,003	0,033
	5	0,003	0,020
	6	0,003	0,038
	7	0,003	0,031
	8	0,003	0,024
16-QAM	1	0,299	0,988
	2	0,232	0,988
	3	0,108	0,980
	4	0,032	0,857
	5	0,017	0,417
	6	0,011	0,278
	7	0,009	0,250
	8	0,007	0,200
64 - QAM	1	0,462	0,999
	2	0,410	0,998
	3	0,393	0,994
	4	0,372	0,998
	5	0,351	0,998
	6	0,321	0,998
	7	0,280	0,996
	8	0,171	0,985

Таблица 11 - Зависимость значений BER и FER от ширины канала

Полоса, МГц	BER	FER
5	0,017	0,222
10	0,003	0,033
15	0,003	0,020
20	0,002	0,008

Таблица 12- Зависимость значений BER и FER от скорости передвижения абонента

Скорость, км/ч	BER	FER
2	0,003	0,033
60	0,053	0,273
120	0,042	0,333
300	0,091	0,4

Таблица 13 - Зависимость значений BER и FER от условий распространения сигнала

Модель условий распространения	BER	FER
Расширенная А-модель пешехода (EPA)	0,003	0,033
Расширенная А-модель при движении в автомобиле (EVA)	0,037	0,5
Расширенная модель для типовой городской застройки (ETU)	0,038	0,417

Заключение

В данной работе было проведено исследование систем связи стандарта LTE. Были рассмотрены основные особенности стандарта: архитектура сети и организация радиointерфейса. На основе полученной информации можно выделить схожие с другими стандартами (WiMAX, WCDMA) элементы, а также некоторые новые особенности (использование SC-FDMA, базовая сеть SAE), которые дают преимущества рассмотренной технологии.

Также в процессе работы были построены модели восходящего и нисходящего каналов связи стандарта LTE с использованием библиотек САПР ADS. Для оценки помехоустойчивости каналов связи был проведен их анализ при изменении ряда параметров передачи (вид модуляции, используемая полоса, конфигурация многоантенных систем, степень корреляции антенн), а также при изменении условий распространения сигнала.

Сформированные в ходе работы модели могут быть использованы при разработке новых приемопередающих устройств, предназначенных для работы с сетями связи стандарт LTE и оценки их чувствительности, помехоустойчивости при воздействии аддитивного белого Гауссова шума, устойчивости к узкополосным помехам.

Библиография

1. Сообщество 4G [Электронный ресурс]:содержит основные сведения об LTE, новости о развитии и внедрении технологии.- Режим доступа: [http:// ru-4G.livejournal.com](http://ru-4G.livejournal.com) — Загл. с экрана. - яз. рус., англ.
2. Шалагинов А. Перспективы LTE //Технологии и средства связи. 2009. №6. С.36-38. ISSN 1562-7144.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 января 2011 г. №57-р План использования полос радиочастот в рамках развития перспективных радиотехнологий в Российской Федерации, 28 января 2011.
4. Тихвинский В.О.,Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура.- М.: Эко-Трендз, 2010. - 284с.:ил. ISBN 978-5-88405-094-5.
5. Сотовая связь: История, стандарты, технологии [Электронный ресурс] : содержит сведения о стандартах сотовой связи, технологиях доступа и передачи данных. - Режим доступа: <http://celnet.ru> — Загл. с экрана. - яз. рус., англ.
6. Дальман Э., Фурускар А., Ядинг И. Радиоинтерфейс LTE в деталях// Сети и Системы связи. 2008. №9. С. 77-81. ISSN 1605-5055.
7. Вишневский В., Красилов А., Шахнович И. Технология сотовой связи LTE - почти 4G// Первая миля. 2009. №2. С.2-13. ISSN 2070-8963.
8. Вишневский В.Л., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX путь к 4G. - М.: Техносфера, 2009. - 472с.:ил. ISBN 978-5-94836-223-6.
9. 3GPP TS 36.101 V8.8.0 Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8)
10. 3GPP TS 25.104 V8.5.0 Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD)(Release 8)

11. Россия | Agilent [Электронный ресурс]: содержит подробную информацию о продуктах компании Agilent Technologies.- Режим доступа: <http://www.home.agilent.com> — Загл. с экрана. - яз. рус., англ.

12. 3GPP TS 36.211 V8.7.0 Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 8)

13. 3GPP TS 36.213 V8.2.0 Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 8)

14. 3GPP TR 25.913 V9.0.0 Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 9)