

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет информационной безопасности

Кафедра инфокоммуникационных технологий

**В. Н. Мищенко**

## **МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия  
для специальности 1-45 80 01 «Системы и сети инфокоммуникаций»*

Минск БГУИР 2024

УДК 621.391(075.8)  
ББК 32.884я73  
М71

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра связи учреждения образования  
«Военная академия Республики Беларусь»  
(протокол № 13 от 06.03.2023);

заведующий кафедрой телекоммуникационных систем  
учреждения образования  
«Белорусская государственная академия связи»  
кандидат технических наук, доцент С. И. Половения

**Мищенко, В. Н.**

М71 Методы передачи сигналов с расширением спектра : учеб.-метод. пособие / В. Н. Мищенко. – Минск : БГУИР, 2024. – 164 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-771-1.

Описаны основные характеристики и способы реализации методов передачи сигналов с расширением спектра в инфокоммуникационных системах.

Предназначено для магистрантов очной и заочной форм обучения, которые обучаются по специальности 1-45 80 01 «Системы и сети инфокоммуникаций».

**УДК 621.391(075.8)**  
**ББК 32.884я73**

**ISBN 978-985-543-771-1**

© Мищенко В. Н., 2024  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	8
Практическая работа № 1. Исследование характеристик каналов для инфокоммуникационных систем.....	10
1.1 Модели каналов в системах инфокоммуникаций.....	10
1.1.1. Особенности гауссовского канала.....	10
1.1.2. Основные особенности каналов Рэля и Райса.....	11
1.1.3. Особенности каналов с учетом эффекта Доплера.....	14
1.2. Ход работы.....	18
1.3. Содержание отчета.....	22
1.4. Контрольные вопросы.....	22
Практическая работа № 2. Изучение характеристик и особенностей построения генераторов псевдослучайных сигналов и кодовых последовательностей .....	23
2.1. Краткие теоретические сведения.....	23
2.2. Ход работы.....	26
2.3. Содержание отчета.....	33
2.4. Контрольные вопросы.....	33
Практическая работа № 3. Исследование характеристик функциональных устройств.....	35
3.1. Функциональные устройства и блоки для инфокоммуникационных систем. Краткие теоретические сведения.....	35
3.2. Ход работы.....	40
3.3. Содержание отчета.....	47
3.4. Контрольные вопросы.....	47
Практическая работа № 4. Исследование характеристик модуляторов и демодуляторов.....	48

4.1. Особенности построения модуляторов и демодуляторов, используемых в инфокоммуникационных системах.....	48
4.2. Ход работы.....	53
4.3. Содержание отчета.....	56
4.4. Контрольные вопросы.....	56
Практическая работа № 5. Исследование характеристик кодеров и декодеров сигналов.....	57
5.1. Кодеры и декодеры сигнала для телекоммуникационных систем.....	57
5.2. Ход работы.....	62
5.3. Содержание отчета.....	67
5.4. Контрольные вопросы.....	67
Практическая работа № 6. Особенности формирования и функционирования беспроводных линий связи .....	69
6.1. Характеристики и параметры антенн.....	69
6.2. Энергетические параметры и характеристики радиолиний.....	73
Практическая работа № 7. Моделирование потерь сигнала в системах сотовой связи стандарта UMTS .....	78
7.1. Определение компонентов потерь сигналов в сетях радиодоступа.....	78
7.2. Моделирование характеристик радиолинии от МС к БС.....	81
7.3. Моделирование характеристик радиолинии от БС к МС.....	83
7.4. Использование моделей расчета потерь радиосигнала. Определение радиуса соты.....	84
7.5. Ход работы.....	85
Практическая работа № 8. Моделирование пропускной способности каналов в системах сотовой связи стандарта UMTS, LTE и NR .....	89
8.1. Особенности моделирования пропускной способности каналов связи стандарта UMTS.....	89
8.2. Ход работы.....	92

8.3. Моделирование пиковой скорости передачи данных в системах сотовой связи стандартов LTE и NR.....	94
8.4. Методические указания и исходные данные для выполнения практической работы.....	99
Практическая работа № 9. Исследование основных характеристик оборудования стандарта IEEE 802.11a.....	101
9.1. Краткие теоретические сведения.....	101
9.1.1. Модуляция со многими несущими и OFDM.....	101
9.1.2. Метод CDMA с прямым расширением спектра и многими несущими.....	102
9.1.3. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением.....	104
9.1.4. Описание лабораторного макета.....	108
9.2. Ход работы.....	113
9.3. Содержание отчета.....	118
9.4. Контрольные вопросы.....	118
Практическая работа № 10. Исследование основных характеристик оборудования стандарта IEEE 802.11b .....	119
10.1. Краткие теоретические сведения.....	119
10.1.1. Особенности реализации методов широкополосной передачи оборудования стандарта IEEE 802.11b.....	119
10.1.2. Описание лабораторного макета.....	122
10.2. Ход работы.....	125
10.3. Содержание отчета.....	131
10.4. Контрольные вопросы.....	132
Практическая работа № 11. Использование программного комплекса ATOLL для проектирования сотовых сетей связи .....	133
11.1. Особенности функционирования программного комплекса ATOLL при выполнении процедур проектирования сотовых сетей связи.....	133

Практическая работа № 12. Моделирование зон покрытия систем сотовой связи .....	145
12.1. Исходные данные и общие указания для проведения моделирования.....	145
12.2. Пример выполнения частотно-территориального проектирования сети сотовой связи для города Лиды .....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	160
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	162

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

AWGN – канал с аддитивным белым шумом, имеющим нормальное гауссовское распределение

BPSK – бинарная (двоичная) фазовая модуляция (манипуляция)

Bit Rate – скорость следования сигналов (бит/с)

BSC – бинарный симметричный канал передачи

CDMA – кодовое разделение каналов

DBPSK – дифференциальная бинарная фазовая модуляция (манипуляция)

DQPSK – дифференциальная квадратурная фазовая модуляция (манипуляция)

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – метод прямого расширения спектра

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – метод скачкообразного расширения спектра

GMSK – гауссовская частотная манипуляция с минимальным сдвигом

LTE – стандарт сотовой связи четвертого поколения

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудная модуляция (манипуляция)

DTX – принцип применения прерывистой передачи сообщения

PSD (Power Spectral Density) – спектральная плотность мощности сигнала

PN (Pseudo Noise) Sequence – псевдослучайная последовательность

UMTS – стандарт сотовой связи третьего поколения

АКФ – периодическая автокорреляционная функция

АС – абонентская станция

БС – базовая станция

КАМ – квадратурный амплитудный модулятор

ОФМ-2 – двухпозиционная относительная фазовая манипуляция

ЧМ – частотная модуляция

ФМ – фазовая модуляция

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты

## ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое издание «Методы передачи сигналов с расширением спектра» подготовлено на кафедре инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» для обучения магистрантов по специальности 1-45 80 01 «Системы и сети инфокоммуникаций» по учебной дисциплине «Методы передачи с расширением спектра».

Основная задача учебно-методического пособия – дать студентам общие систематизированные сведения об организации и особенностях функционирования систем передачи сигналов с широкополосным спектром. Системы и сети представляют собой объединение аппаратуры, которая управляется с помощью программного обеспечения. Это позволяет осуществить передачу информационных сигналов между абонентами с высокими параметрами и качеством связи. Процесс передачи информационных сообщений сопровождается процедурами модуляции и кодирования, генерации псевдослучайных последовательностей и кодов, которые определяют эффективность передачи сообщения.

В учебно-методическом издании представлен комплекс практических работ, который дает возможность изучить особенности построения систем передачи сигналов с расширением спектра, особенности функционирования каналов и функциональных узлов, методики моделирования основных параметров и характеристик каналов связи, которые используются для систем сотовой связи и беспроводного доступа.

В первой практической работе выполняется исследование характеристик каналов передачи информации для инфокоммуникационных систем, во второй практической работе – изучение характеристик и особенностей построения генераторов псевдослучайных сигналов и кодовых последовательностей, в третьей практической работе – исследование характеристик и особенностей функцио-

нальных устройств. В четвертой практической работе описаны основные характеристики модуляторов и демодуляторов. В пятой практической работе уделяется внимание исследованию характеристик кодеров и декодеров сигналов, в шестой практической работе – изучению особенностей формирования и функционирования беспроводных линий связи. В седьмой практической работе рассмотрены методики расчета бюджета потерь радиолиний в системах сотовой связи стандарта UMTS. В восьмой практической работе изучаются особенности расчета предельной емкости соты в системах сотовой связи стандарта UMTS. В девятой практической работе выполняется исследование общих принципов построения оборудования стандарта IEEE 802.11a. В десятой практической работе изучаются основные характеристики оборудования стандарта IEEE 802.11b. В одиннадцатой практической работе рассмотрено использование программного комплекса ATOLL для проектирования сотовых сетей связи. В двенадцатой практической работе выполняется исследование основных процедур моделирования зон покрытия систем сотовой связи.

## Практическая работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ДЛЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Цель работы:* изучить характеристики и особенности каналов для инфокоммуникационных систем.

#### 1.1. Модели каналов в системах инфокоммуникаций

Основными каналами, которые используются в системах связи для описания передачи информации, являются гауссовский канал, или канал с белым шумом, каналы Рэлея и Райса, а также группа каналов с учетом эффекта Доплера – каналы Кларка, Джейкса и канал с учетом эффекта фединга [16].

##### 1.1.1. Особенности гауссовского канала

Гауссовский канал можно представить как канал, в котором к информационному сигналу добавляется сигнал помехи, и эти два сигнала складываются линейно [16]. Важно отметить, что величина энергии спектра для такого канала остается неизменной во всем диапазоне работы системы связи. Название канала «Канал с белым шумом» происходит из анализа спектральных характеристик сигналов, которые были получены в диапазоне оптических длин волн и характеризуют спектр так называемого белого цвета. Достоинством использования такого канала при описании процессов передачи информации является его простота реализации, легкость внедрения в разрабатываемые математические модели, которые используются для описания систем инфокоммуникаций. Однако, как показали результаты многочисленных экспериментальных исследований, спектральные характеристики реальных сигналов и помех имеют немонотонные и нестационарные характеристики и могут значительно отличаться от характеристик гауссовского канала.

### 1.1.2. Основные особенности каналов Рэля и Райса

Более реалистичными и наиболее часто используемыми каналами в системах радиосвязи являются каналы Рэля и Райса. Как показали многочисленные экспериментальные исследования, в системах радиосвязи имеют место значительными изменения уровня сигнала (замирания), обусловленные распространением радиоволн в виде многих траекторий (или лучей). Отсюда происходит название этого эффекта – многолучевое распространение радиоволн, которое обуславливает большие ограничения на процесс передачи информации по радиоканалам. Простейший вариант наблюдается в случае прямой видимости между передатчиком и приемником и представляет собой прямую линию. При наличии объектов, которые переотражают электромагнитные волны, формируется некоторое количество других путей прохождения. На рис. 1.1 они показаны в виде ломаных линий «Передатчик (Пд) – отражатель – приемник (Пр)», где один луч с длиной пути  $r_1 + r_2$ , другой луч –  $r_3 + r_4$ .

Таким образом, между передатчиком и приемником может формироваться достаточно много траекторий прохождения электромагнитных волн (лучей), каждая из которых имеет разную длину своего распространения. В условиях города число возможных лучей такого происхождения может быть очень большим, и значения фазовых сдвигов этих сигналов могут формировать диапазон значений от 0 до  $160^\circ$  [20].

Особенности радиотрасс связаны с эффектами многочисленных отражений радиоволн от различных препятствий, а также зачастую и с отсутствием прямой видимости между антеннами передающего и приемного комплексов.

Требуют учета эффекты дифракции, т. е. рассеяния радиоволны на препятствиях в виде зданий, неровностей рельефа местности и других объектов, когда передатчик и приемник сотовой системы связи располагаются в интенсивной городской застройке. Абонентское оборудование может находиться внутри зда-

ний, в лесных массивах и т. д., тогда приходится учитывать эффекты проникновения электромагнитных волн в препятствия, их рассеяние на различных предметах, находящихся в зоне их распространения.

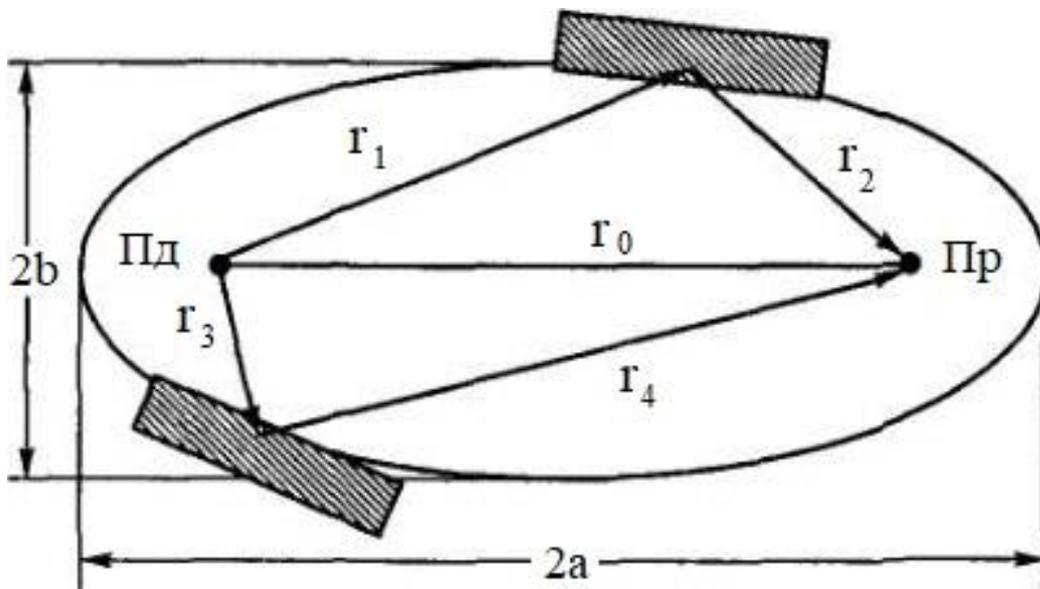


Рис. 1.1. Формирование условий многолучевого канала

Эффекты рассеяния и затухания электромагнитных волн обуславливают существенные ограничения на достижимое качество передачи информации по многолучевому каналу и приводят к необходимости заметного усложнения алгоритмов демодуляции принимаемого сигнала в приемнике [20].

В той ситуации, когда в канале есть только отраженные лучи и нет составляющей, которая формируется за счет прямой видимости между антеннами приемника и передатчика, этот канал называют рэлеевским [16; 20]. В противном случае при наличии такой регулярной составляющей говорят об обобщенном законе Рэля (или законе Райса) [16]. К каналам Райса обычно относят каналы, которые формируются с использованием антенн, имеющих узкий главный лепесток диаграммы направленности и находящихся на расстоянии прямой видимости, не затеняемых препятствиями и преградами различного происхождения.

На рис. 1.2 представлена структурная схема установки, которая позволяет исследовать характеристики канала, который подчиняется закону Рэлея. Она состоит из следующих блоков и устройств. Блок (1) – генератор входного сигнала, у которого по умолчанию установлена амплитуда комплексного сигнала, равная 1 В, мощность – 1 Вт, частота – 5 Гц. Блок (2) позволяет выбрать один из типов исследуемых каналов – Райса (Rice) и Рэлея (Rayleigh) – и выполнить настройки выбранного канала. Возможные настройки этого канала следующие: при установке нуля для поля «Тип модели» (Rice Factor) выбирается рэлеевский канал (чистое рассеяние), при установке единицы – исследуется райсовский канал. Далее можно выбрать настройки выбранного канала – значение частоты Доплера (RMS Doppler Shift) в герцах, уровень затухания (RMS Fade Level) в децибелах [16]. Блок (3) предназначен для измерения изменяющейся выходной средней мощности (параметр Sliding Average Complex Power), размерность в ваттах. Зависимость выходной средней мощности, полученной с помощью блока (3), отображается на экране графопостроителя, или плоттера (4). Измерительные блоки (5) и (6) позволяют получить зависимость изменения затухания в канале (параметр Channel Fading), выраженную в децибелах. Блок (7) позволяет оценить изменения фазы сигнала (параметр Channel Phase Rotation), выраженной в градусах, путем сравнения фазы сигнала на входе и выходе установки [16].

Анализ рис. 1.2 показывает, что при исследовании характеристики канала, который подчиняется закону Рэлея, наблюдаются значительные изменения затухания сигнала, которые могут достигать величины до 20 дБ при незначительных изменениях средней мощности сигнала. Наблюдаются также значительные изменения фазы сигнала.

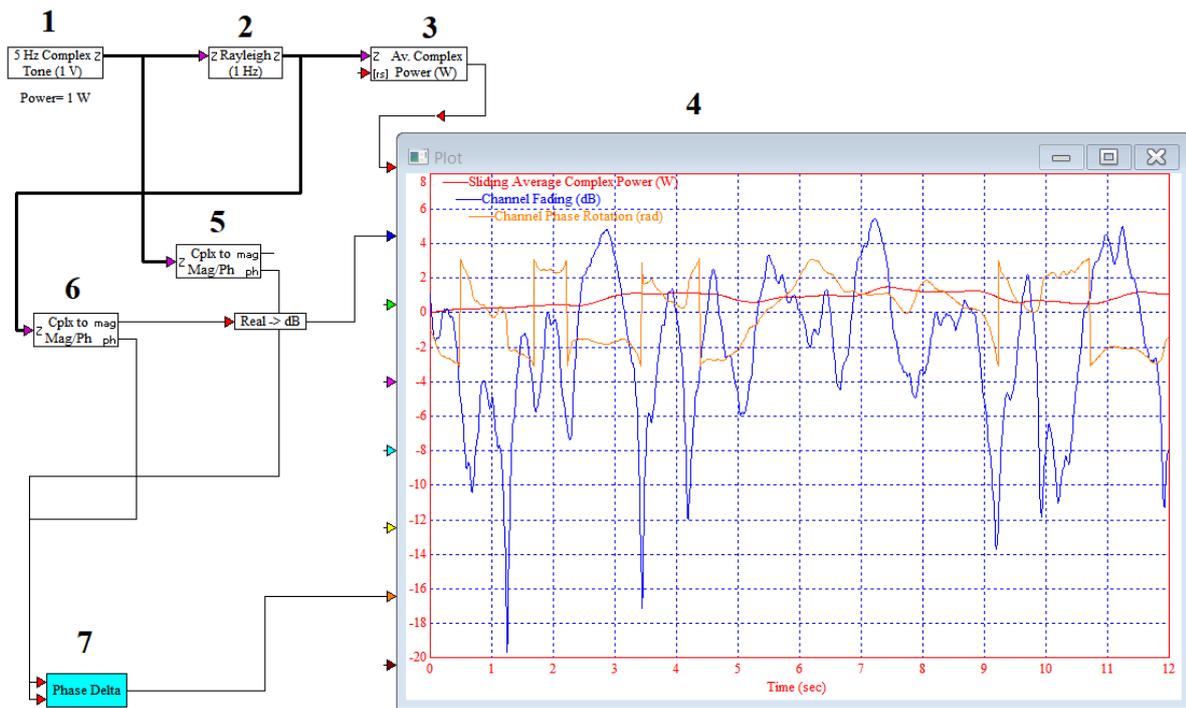


Рис. 1.2. Исследование характеристик канала, который подчиняется закону Рэля

### 1.1.3. Особенности каналов с учетом эффекта Доплера

Рассмотрим модели каналов с учетом эффекта Доплера. Как известно из курса физики, при движении передатчика, который излучает сигнал, его частота изменяется на частоту Доплера, которая определяется скоростью перемещения этого объекта. Рассмотрим каналы, в которых учитываются модель Джейкса (Jakes), модель канала с эффектом фединга (fading) и модель Кларка (Clarke). Канал с моделью Джейкса является каналом с замираниями сигнала, характерными при связи с подвижными объектами. Основными эффектами, которые учитываются для этого канала, являются эффект Рэля, что связано с проявлением эффекта многолучевости, и эффект Доплера, суть которого связана с изменением несущей частоты и соответствующего преобразования спектра сигнала.

Модель канала с эффектом фединга (fading) аналогична модели канала Джейкса, но здесь для получения результатов используются другие математические процедуры. Для расчета формы сигнала его гармонические компоненты передаются через взвешивающий фильтр, далее эти компоненты перемножаются с входным сигналом, а не складываются, как в модели Джейкса.

Для модели Кларка характерны главным образом эффекты рассеяния радиоволн. Обычно для этой модели считается, что поле, которое создается в раскрыве антенны мобильной станции, формируется как наложение друг на друга большого числа приходящих волн со случайными значениями азимутального направления и фазового сдвига. Учитывая это обстоятельство, а также то, что доплеровское смещение частоты АС невелико по сравнению с частотой несущего колебания, суммарное электромагнитное поле в месте расположения приемной антенны может быть описано как узкополосный случайный процесс.

Модель канала Джейкса исследована с использованием схемы, показанной на рис. 1.3. Основной блок (6), в котором заложена эта модель канала, описывается следующими параметрами при умолчании. Так, число слагаемых (или термов) (Number of Terms) равно 8. Значение частоты Доплера (Doppler Frequency) задается равным величине 5 Гц. Входной сигнал формируется блоком (5), обеспечивающим постоянный сигнал, который затем в блоке (7) преобразуется в комплексную форму.

На выходе канала (6) установлен блок (11), который определяет модуль амплитуды сигнала. Этот сигнал отображается в виде осциллограммы на экране виртуального осциллографа (2) (Signal Fading). Осциллограмма отображается в течение приблизительно 250 условных секунд моделирования. Блок (8) измеряет среднюю мощность сигнала с помощью блока преобразования (9). Это время задается блоком одиночного запуска (10).

Блок прямого преобразования Фурье (4) образует спектральную характеристику, которая отображается в виде сложного сигнала, представленного на экране виртуального анализатора спектра. Причем размерность сигнала (Fading

Spectrum) по вертикальной оси – спектральная плотность мощности (PSD – Power Spectral Density) [16].

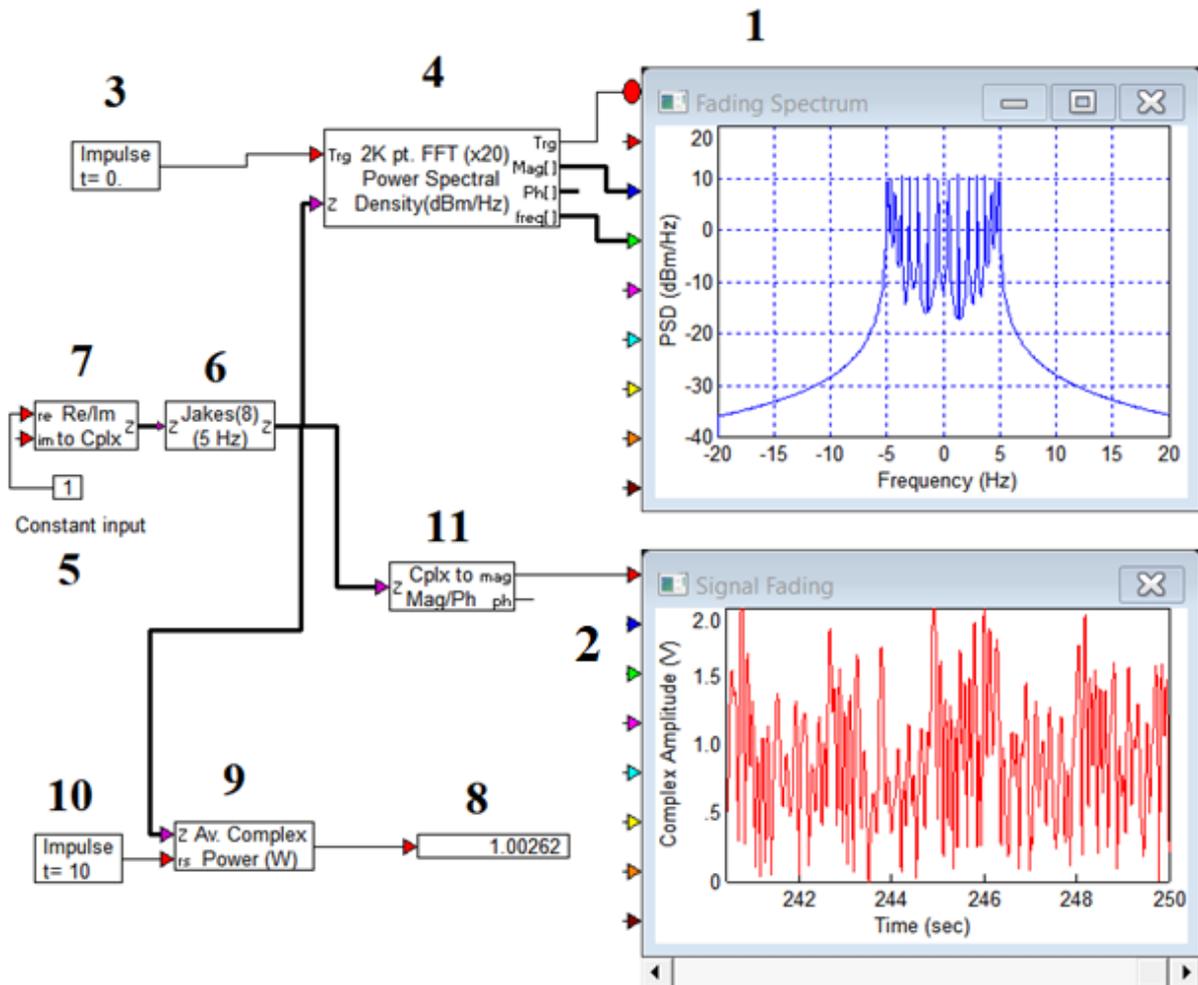


Рис. 1.3. Схема и результаты исследования канала Джейкса

Изучение модели канала с эффектом фединга выполняется по схеме, которая представлена на рис. 1.4. Блок (7) характеризуется следующими параметрами. Параметр Number of Taps задает число выборок внутреннего взвешивающего фильтра и равен 128. Величина доплеровской частоты (Doppler Shift) равна 5 Гц. Назначение остальных блоков аналогично назначению блоков на рис. 1.1.

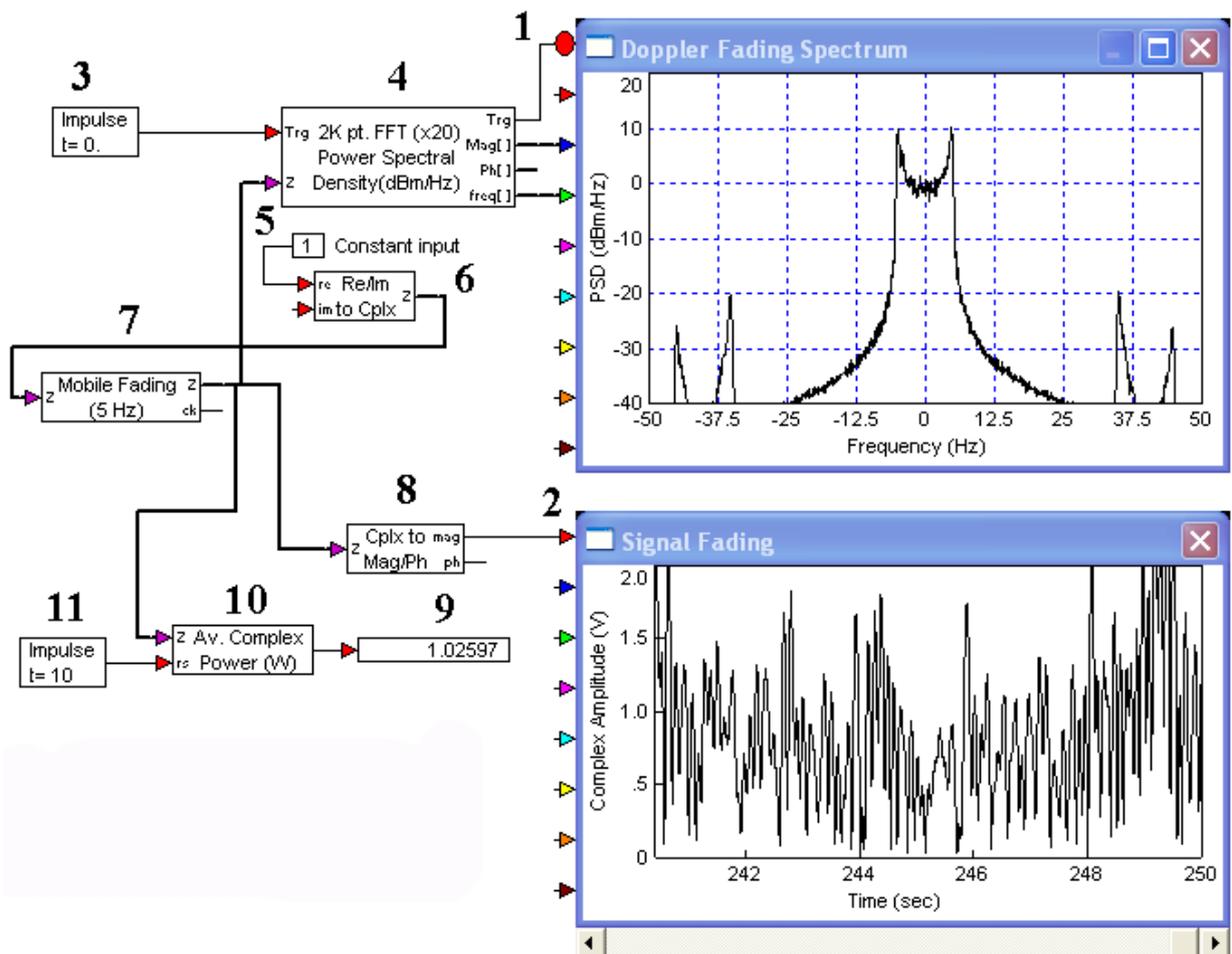


Рис. 1.4. Схема и результаты исследования канала с эффектом фединга

Выполняя анализ результатов, полученных с помощью схем на рис. 1.1 и 1.2, можно сделать следующий вывод: усредненный уровень сигнала на выходе канала Джейкса несколько меньше уровня сигнала на выходе канала с эффектом фединга. Это видно при сравнении блоков (8) и (9) на рис. 1.3 и 1.4 соответственно.

Однако можно заметить, что максимальные и минимальные значения сигнала на выходе прибора (2) на рис. 1.4 меньше по сравнению с показаниями прибора (2) на рис. 1.3, при этом спектр канала с эффектом фединга заметно шире за счет наличия боковых лепестков.

## 1.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера.

2. В меню File выбрать команду Open. Открыть папку Channels и загрузить файл AWGN. Данная схема позволяет исследовать характеристики канала AWGN – канала с аддитивным белым шумом, имеющим нормальное гауссовское распределение.

Проверить настройки канала AWGN. Подвести курсор к полю AWGN, дождаться появления значка , нажать правую кнопку мыши. Записать настройки этого канала: число прогонов (Number of Runs), символьную скорость (Symbol Rate), среднюю мощность сигнала (Ref. Av. Complex Signal Power), отношение сигнал/шум для каждого из прогонов – ( $E_s/N_o$ ), размерность мощности (Ref. Power Units).

Проверить настройки блока BER Curve Control. Для этого подвести курсор к полю BER Curve Control SER/BER и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Появится контрольное окно Curve Control Properties. Записать значения параметров, представленных в этом окне. Исследовать остальные узлы и блоки схемы: источник сигнала (Data Source), блок задержки сигнала (Delay), приемник (Receiver), блок, обеспечивающий фиксацию и отображение переданных и ошибочно переданных бит (BERnum) и т. д.

Нажать кнопку ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученное изображение кривой зависимости вероятности (коэффициента) ошибки от отношения сигнал/шум.

При всех измерениях необходимо фиксировать значения индикаторов, которые позволяют характеризовать тракт с позиции коэффициента ошибок, т. е. индикаторов Overall Bit Count, Number of Bit Error и Bit Errors Estimate. При необходимости указанные индикаторы можно обнулить: подвести курсор к необхо-

димому индикатору и нажать правую кнопку мыши. Для получения дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help.

Изменить параметры сигнала при подаче его в тракт канала AWGN. Для этого подвести курсор к полю QPSK Mod и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Установить значения амплитуды 0,2 В. Снять зависимость вероятности (коэффициента) ошибки от отношения сигнал/шум при указанном значении амплитуды сигнала. Аналогичные измерения выполнить при значениях амплитуды сигнала, равных 0,5 и 0,7 В.

Установить значение амплитуды сигнала равным 1 В и значение разбаланса фазы (Phase Imbalance), равное 2°. Зарисовать и проанализировать полученную кривую. Аналогичные измерения выполнить при значениях разбаланса фазы, равных 5 и 10°. При проведении всех измерений просматривать и фиксировать зависимости, которые формируются на плоттере Error History. Закрывать файл AWGN.

3. В меню File выбрать команду Open. Открыть папку Channels и загрузить файл Jakes. Данная схема позволяет исследовать характеристики канала Jakes – канала с замираниями, характерными для подвижной связи.

Проверить настройки канала Jakes. Для этого подвести курсор к полю блока (6), имитирующего канал Jakes, и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить настройки этого канала и записать их в отчет.

Подвести курсор к полю блока (9) (см. рис. 1.1), который производит измерение средней мощности сигнала, и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать параметры этого прибора: размерность измеряемой мощности (Output), величину нагрузки (Load), режим работы (Mode). Исследовать и записать параметры других блоков и устройств в схеме. Для этого необходимо подвести курсор к полю соответствующего блока или устройства и после появления значка  нажать правую кнопку мыши.

Нажать кнопку ПУСК, расположенную в ряду функциональных кнопок в верхней части рабочего поля экрана монитора. Зарисовать и проанализировать полученное изображение кривых на индикаторах анализатора спектра (Fading Spectrum) и плоттера (Signal Fading). Записать в отчет измеренное значение средней мощности. Для получения дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help. Для просмотра различных участков осциллограммы сигнала на плоттере необходимо подвести курсор к полю этого блока и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Далее необходимо войти на закладку Axis и изменить установки параметров Displayed Time и Scroll Back Interval.

Изменить параметры канала. Для этого подвести курсор к полю Jakes и после появления значка  нажать правую клавишу мыши. Установить частоту Доплера (Doppler Frequency) равной 1 Гц. Снять полученный спектр сигнала на анализаторе спектра. Изменить значения максимальной частоты Доплера, установив последовательно значения 2, 10, 20 Гц. Зарисовать и проанализировать полученные кривые. При проведении всех измерений просматривать зависимости, которые формируются на плоттере Error History.

4. В меню File выбрать команду Open. Открыть папку Channels и загрузить файл Rayleigh. Данная схема позволяет исследовать характеристики каналов Райса (Rice) и Рэля (Rayleigh) – каналов с замираниями, характерными для радиосвязи.

Проверить настройки каналов Райса (Rice) и Рэля (Rayleigh). Для этого подвести курсор к полю блока Rayleigh (1 Hz), имитирующего эти каналы. После появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать настройки этого канала. Тип исследуемого канала задается цифрой: при установке нуля исследуется рэлеевский канал, при установке единицы – райсовский канал. Установить следующие настройки канала: значение частоты Доплера (RMS Doppler Shift) – 2 Гц, среднеквадратичное значение затухания (RMS Fade Level) – 1 дБ.

Нажать кнопку ПУСК, расположенную в ряду функциональных кнопок в верхней части рабочего поля экрана монитора. Зарисовать и проанализировать полученное изображение кривых на индикаторе плоттера (Plot). Исследовать полученные три зависимости: затухания в канале (Channel Fading) в децибелах, изменения фазы сигнала (Channel Phase Rotation) в градусах и изменяющейся средней мощности (Sliding Average Complex Power) в ваттах. Для получения дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help. Для просмотра различных участков осциллограммы сигнала на плоттере необходимо подвести курсор к полю блока Plot и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Далее необходимо войти на закладку Axis и изменить установки параметров осей X и Y, а также при необходимости значения параметров Displayed Time и Scroll Back Interval.

Изменить значения частоты Доплера, установив последовательно значения 2, 10, 20 Гц. Нажать кнопку ПУСК, расположенную в ряду функциональных кнопок в верхней части рабочего поля экрана монитора. Скопировать или зарисовать в отчет, проанализировать полученное изображение кривых на индикаторе плоттера (Plot).

Установить тип модели Rice Factor равным единице, что соответствует исследованию райсовского канала. Повторить все исследования, выполненные выше для значений частоты Доплера, и значения затухания (RMS Fade Level), при которых исследовался рэлеевский канал. Скопировать или зарисовать в отчет, а затем проанализировать полученные кривые.

5. Открыть и просмотреть файлы с программами Fading.vsm, Jakes.vsm, Propagationloss.vsm, которые имитируют работу разных каналов телекоммуникационных систем. Нажать кнопку ПУСК. Скопировать или зарисовать в отчет, а затем проанализировать полученные кривые. Для дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help.

6. Сделать и записать в отчет выводы. Выйти из программы, выключить компьютер.

### **1.3. Содержание отчета**

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы исследованных каналов и источников сигнала.
2. Полученные графические зависимости.
3. Выводы по проделанной работе.

### **1.4. Контрольные вопросы**

1. Опишите основные особенности канала распространения радиоволн, которые подчиняются закономерностям канала Гаусса.
2. Поясните измерения при исследовании канала AWGN.
3. Раскройте основные особенности канала с эффектом фединга.
4. Опишите основные параметры и характеристики канала распространения радиоволн, которые подчиняются закону Рэлея.
5. Опишите основные параметры и характеристики канала распространения радиоволн, которые подчиняются закону Райса.
6. Назовите основные характеристики и параметры канала Джейкса.

## Практическая работа № 2

# ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ И КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

**Цель работы:** изучить характеристики и особенности построения генераторов псевдослучайных сигналов и кодовых последовательностей для инфокоммуникационных систем.

### 2.1. Краткие теоретические сведения

Наиболее широкое применение в широкополосных системах связи нашли псевдослучайные  $M$ -последовательности, последовательности (коды) Уолша и последовательности Баркера [21].

$M$ -последовательности с периодом  $N = 2^n - 1$  формируются с применением регистра сдвига длиной  $n$  [21]. Включая обратные связи, можно задать основные параметры и характеристики  $M$ -последовательности. Для примера на рис. 2.1 рассмотрен генератор, который использует генераторный полином вида  $G(x) = X^5 + X^2 + 1$ . При этом формируется  $M$ -последовательность, длина которой составляет  $N = 31$ . Можно установить начальные  $n$  символов  $M$ -последовательности за счет начальной установки состояния ячеек регистра. Можно использовать любого исходное состояние регистра, но отличное от всех нулей. Комбинация из  $n$  нулей является запрещенной. С поступлением на тактовый вход регистра очередного тактового импульса, состояние ячеек регистра последовательно меняется.

Таким образом, можно установить, что  $M$ -последовательности являются периодическими с периодом  $N = 2^n - 1$  символов, где  $n$  – произвольное целое положительное число [21]. Автокорреляционная функция (АКФ) любой  $M$ -последовательности имеет постоянный уровень боковых лепестков, равный  $(-1/N)$ .

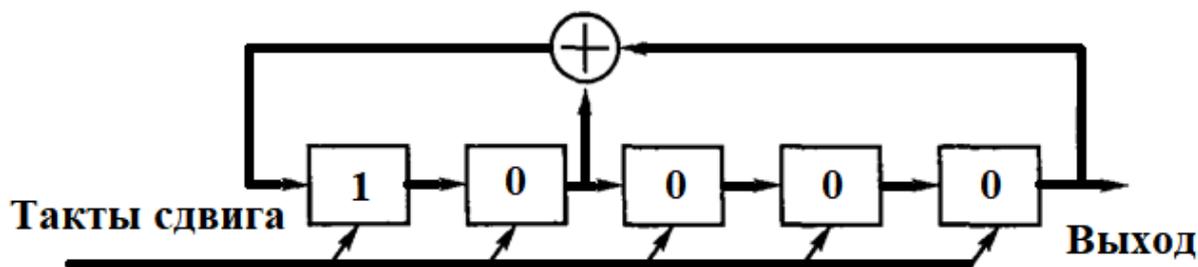


Рис. 2.1. Структурная схема генератора M-последовательности

Уровень максимальных боковых лепестков аperiodической АКФ примерно составляет  $1/\sqrt{N}$ .

Широкое распространение получили ансамбли последовательностей Уолша. Наблюдается ортогональность различных по длине таких последовательностей. Они могут быть легко сгенерированы с использованием цифровых схем. Функции Уолша формируются как соответствующие строки из матриц Адамара. Так матрица Адамара первого порядка выглядит следующим образом:

$$H_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}. \quad (2.1)$$

Правило формирования матрицы Адамара k-порядка:

$$H_k = \begin{vmatrix} H_{k-1} & H_{k-1} \\ H_{k-1} & -H_{k-1} \end{vmatrix}. \quad (2.2)$$

Для поиска псевдослучайных последовательностей, обладающих приемлемыми характеристиками, обычно рассматривается критерий минимума боковых лепестков их аperiodических АКФ. Было установлено, что лучше всего этому критерию удовлетворяют последовательности (коды) Баркера. Получено только шесть последовательностей Баркера с длинами  $N = 3, 4, 5, 7, 11$  и  $13$ . Анализ

данных указывает на то, что величина боковых лепестков АКФ последовательностей Баркера лежит в диапазоне от  $1/N$  до  $-1/N$ . Исключение составляет последовательность при  $N = 4$ , когда уровень бокового лепестка равен нулю.

Последовательность Баркера для  $N = 7$  представлена на рис. 2.2, вид ее АКФ показан на рис. 2.3.

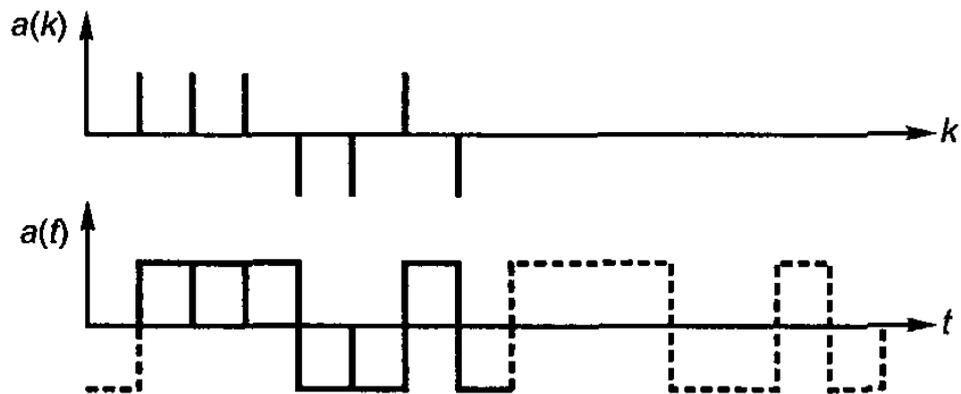


Рис. 2.2. Последовательность Баркера для  $N = 7$

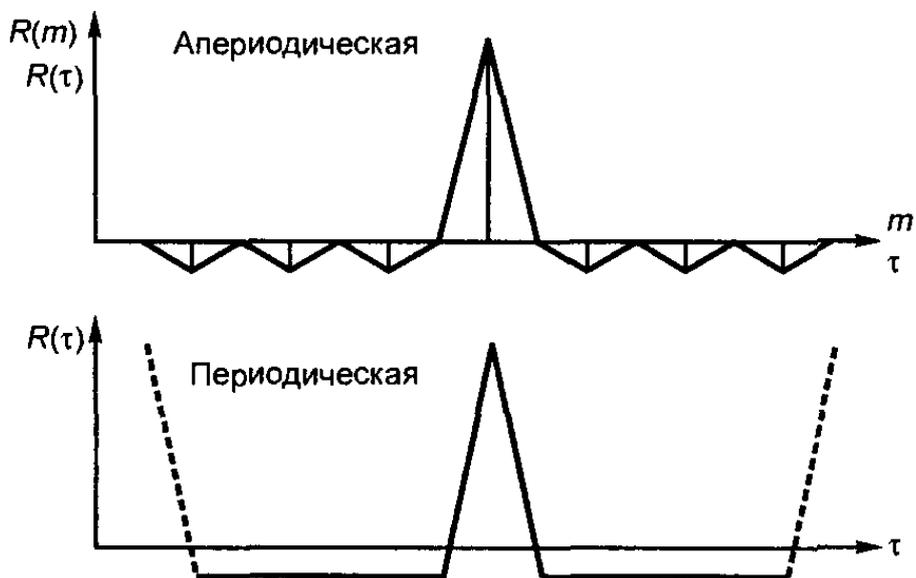


Рис. 2.3. Апериодическая и периодическая АКФ для последовательности Баркера для  $N = 7$

Поиски последовательностей Баркера при значении  $N$  больше 13 успехом не увенчались.

## 2.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера по пути  $C:\backslash\text{VisSim50}\backslash\text{CommExamples}$  (или по другому пути, который указан преподавателем).

2. В меню File выбрать команду Open. Открыть файл PN Sequence. В этом файле представлен пример построения генератора M-последовательностей в виде псевдослучайного сигнала (рис. 2.4). На этом рисунке представлены три генератора псевдослучайных сигналов: 127 PN Sequence, 31 PN Sequence, 32 PN Sequence и два измерительных прибора: плоттеры или графопостроители, которые обозначены как Pseudo Noise (PN) Sequence.

В схеме, расположенной в верхней части экрана, изменить настройки источника псевдослучайного сигнала, который формируется на базе регистров сдвига с дополнительными обратными связями. Для этого подвести курсор к полю «127 PN Sequence» – это генератор, сформированный на базе 7-разрядного регистра сдвига (псевдослучайная последовательность размером  $2^n - 1 = 2^7 - 1 = 127$ ). После появления значка  $\leftrightarrow$  нажать правую кнопку мыши. Проверить и записать в отчет значения параметров этого генератора: разрядность  $n$  регистра сдвига, начальное состояние внутреннего сдвигового регистра в восьмеричном формате, значение параметра, который задает исходное состояние выходной последовательности.

Проанализировать и записать значения остальных параметров генератора: параметр, который определяет формирующий код (в восьмеричном формате) для PN-последовательности, величина этого параметра по умолчанию определяется при выборе опции Default Generator Coefficient. Далее записать значения параметра, который задает последовательность с дополнительным нулем. Последними параметрами в этой панели являются параметры, которые задают вид выходного сигнала: сигнал в форме  $(-1; 1)$  или  $(0; 1)$ , вид синхронизации (параметр

Timing): внутренняя или внешняя, скорость следования сигналов (параметр Bit Rate) в битах в секунду для режима Internal Timing mode, время старта (параметр Start Time) в секундах.

Нажать клавишу Enter. Запустить программу кнопкой ПУСК, расположенной в верхней части экрана. Скопировать или зарисовать в отчет и проанализировать полученное изображение сигнала.

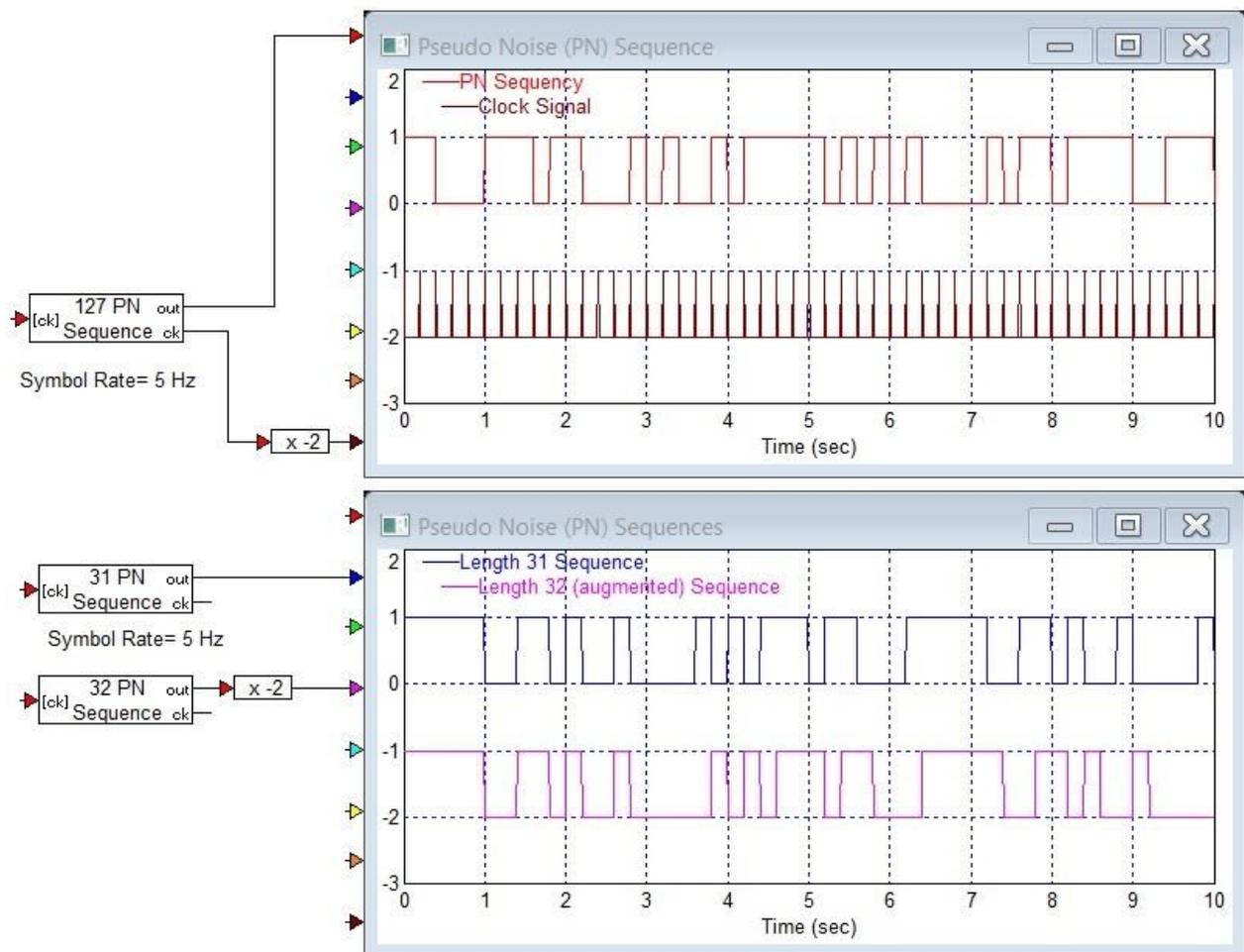


Рис. 2.4. Внешний вид лабораторной панели при исследовании свойств источников сигнала с помощью файла PN Sequence

При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера Pseudo Noise (PN) Sequence.

Для этого подвести курсор к полю Pseudo Noise (PN) Sequence и после появления значка  $\leftrightarrow$  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера. На панели Options включены параметры со следующими выбранными значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы), X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии). Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – 2, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – –4, X Upper Bound (верхняя граница по X) – 10, X Lower Bound (нижняя граница по X) – 0, Time Scaling (масштаб времени) – None (нет), Sub Plot Count (указатель количества дополнительных рабочих областей) – 1. Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому они здесь подробно не рассмотрены. Для получения более детального изображения спектра можно произвести изменение указанных выше параметров, подбирая их под тот участок спектра, где необходима детализация. В частности, в программе по оси X фиксируются и отрицательные значения частоты, которые в реальных приборах, связанных с измерением спектра, отсутствуют. При необходимости можно выполнить стирание полученного изображения. Для этого необходимо снова войти в Plot Properties и на панели Options нажать кнопку Clear Overplot. Для удобства анализа можно подобрать значения параметров панели Axis: Y Upper Bound, Y Lower Bound, X Upper Bound, X Lower Bound.

Провести исследования при других значениях параметра Sequence Offset, равных единице, двум, а затем и трем, скопировать или зарисовать полученные изображения в отчете, как и в предыдущем пункте, сделать выводы.

Исследовать источники псевдослучайного сигнала с длиной регистра, равной пяти, – это генераторы 31 PN Sequence и 32 PN Sequence. Выходной сигнал у последнего генератора представляет последовательность с добавленным разрядом. Нажать кнопку ПУСК. Скопировать или зарисовать и проанализировать два полученных изображения сигнала. Для получения дополнительной информации

о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help. В меню File выбрать кнопку Close.

3. В меню File нажать кнопку Open. Открыть папку Signal Sources и загрузить файл Walsh. Файл содержит пример для исследования генераторов последовательностей Уолша (Walsh) (рис. 2.5). На рис. 2.5 представлены три генератора последовательностей Уолша (Walsh): Walsh (5, 32), Walsh (21, 32), Walsh (ext, 32) и два измерительных прибора: плоттеры или графопостроители, которые обозначены как Walsh Sequence.

Для генератора, расположенного в верхней части экрана, изменить настройки источника псевдослучайного сигнала. Для этого подвести курсор к полю Walsh (5, 32) Sequence и после появления значка  нажать правую кнопку мыши.

Установить значение параметра Matrix Output Row (номер строки матрицы), равное нулю, значение параметра Sequence Offset (определяет номер стартовой позиции в псевдослучайной последовательности), равное единица, значение параметра Sequence Length (Octal) (длина последовательности может быть от 2 до 256), равное четырем.

Записать установленные по умолчанию остальные параметры генератора Уолша: режим выхода: биполярный сигнал (-1; 1) или бинарный (0; 1), вид синхронизации: внутренняя или внешняя, скорость следования сигналов в битах в секунду, время старта в секундах, выбор строки: внешняя или внутренняя [20].

Три выходных сигнала генератора имеют следующие значения: out – выходная последовательность Walsh, ck – выход или вход тактовых импульсов, Frck – выход тактовых импульсов кадров.

Нажать кнопку ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученное изображение сигнала.

Установить значение параметра Matrix Output Row равным единице. Нажать кнопку ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученные изображения

сигнала. Аналогичные измерения выполнить при значениях параметра Matrix Output Row, равных двум и трем. Сделать выводы.

Зарисовать и проанализировать на нижнем плоттере полученные кривые для двух генераторов Уолша: Walsh (21, 32) Sequence и Walsh (ext, 32) Sequence.

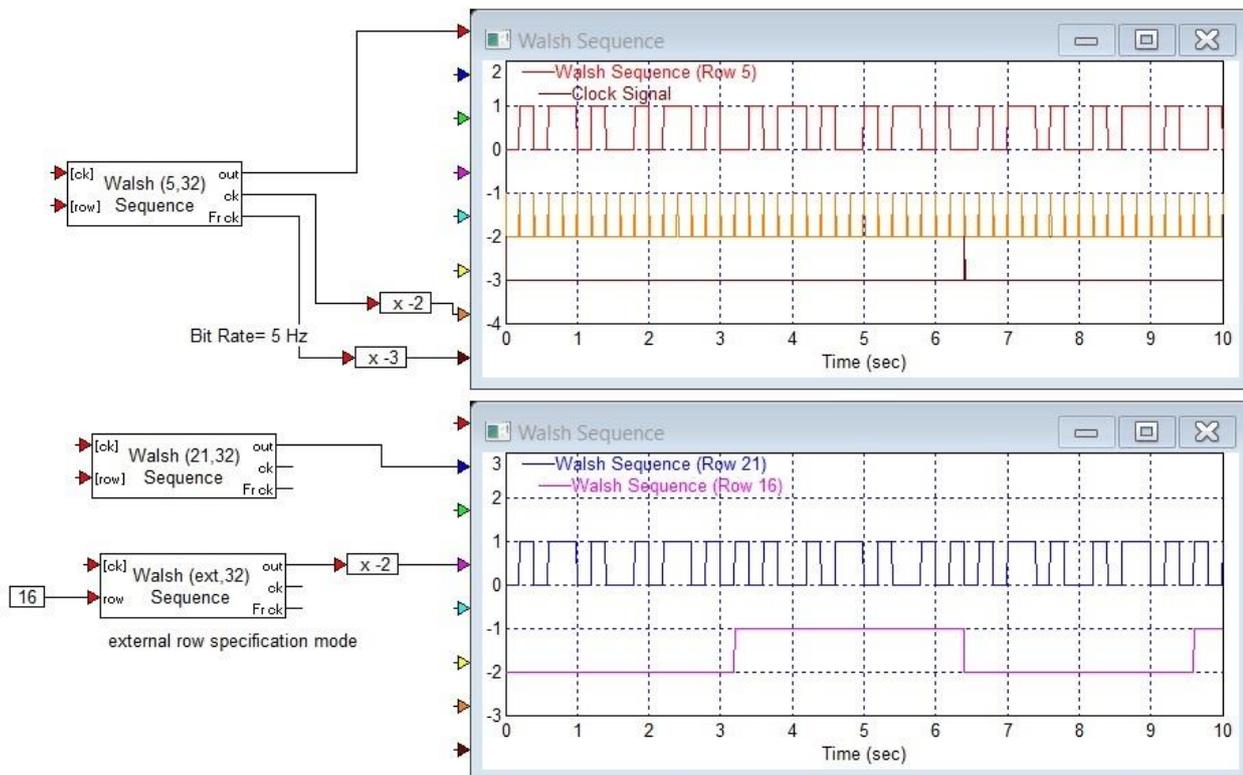


Рис. 2.5. Внешний вид лабораторной панели при исследовании свойств источников сигнала с помощью файла Walsh

Последний генератор работает в режиме внешнего запуска от источника 16, что жестко определяет номер 16 строки матрицы. Для получения дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help. В меню File выбрать кнопку Close.

4. Для просмотра и изучения свойств последовательностей Баркера необходимо открыть файл IEEE 802.11b\_DBPSK.vsm.

Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования блоков для демонстрации работы стандарта IEEE 802.11b (Wi-Fi), в котором используется дифференциальная бинарнофазовая манипуляция (DBPSK) и код Баркера DBPSK, показан на рис. 2.6.

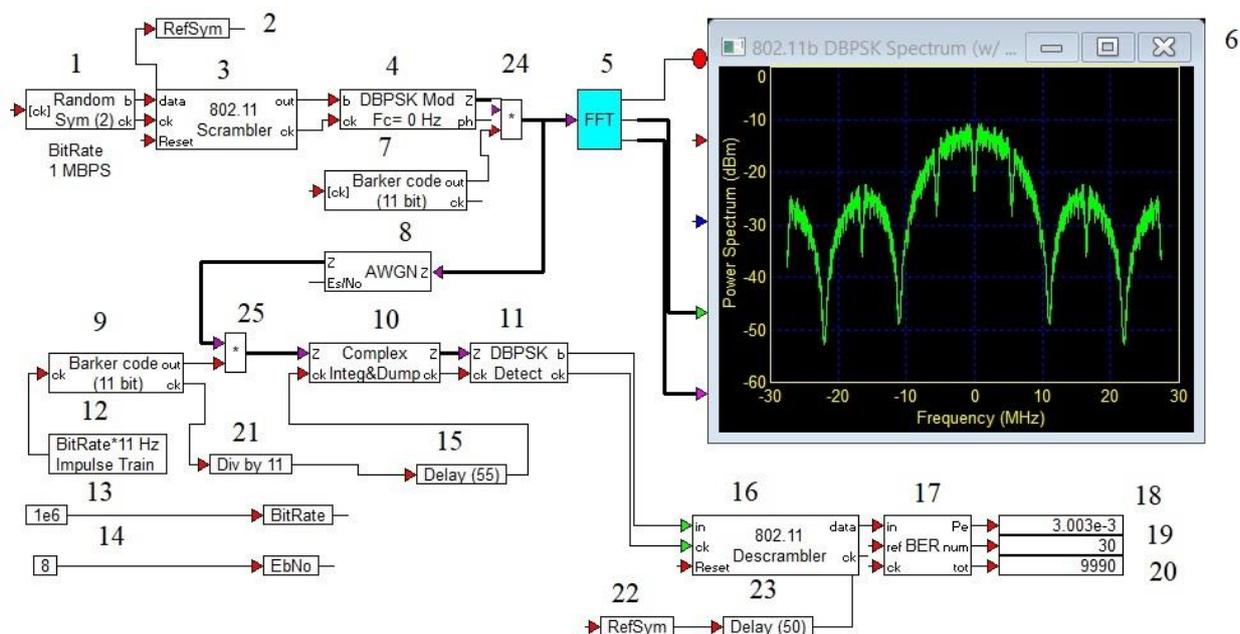


Рис. 2.6. Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11b DBPSK

Сигнал из генератора (1) подвергается скремблированию в блоке 802.11 Scrambler (3), а затем поступает в блок DBPSK mod (4). Далее сигнал перемножается в блоке 24 с 11-битным кодом Баркера (7) и подается в канал AWGN (8) и через блок FFT (5) на анализатор спектра (6). Для просмотра формы кодов Баркера необходимо в схему, представленную на рис. 2.6, добавить дополнительный прибор – осциллограф, который необходимо присоединить к выходу генератора кода Баркера, обозначенному цифрой 7 на рис. 2.6. Для этого необходимо из линии дополнительных приборов, представленных в верхней части рабочей области программы, выбрать и затем на свободное место перетащить прибор под названием Plot. Для соединения выхода генератора кода Баркера, обозначенного

буквами out, необходимо воспользоваться специальным рабочим оператором, который в верхнем ряду обозначен стрелкой со знаком +. После выбора этого оператора с помощью правой клавиши компьютерной мыши необходимо провести условную соединительную линию между линией, которая выходит из генератора кода Баркера (клемма out) и одним из любых входов прибора Plot.

После присоединения прибора Plot запустить программу на выполнение, нажав кнопку ПУСК. После завершения работы программы наблюдать форму кода Баркера на экране прибора Plot. Для получения необходимой для просмотра формы сигнала параметров развертки по осям X и Y, необходимо подвести курсор к рабочей области прибора Plot и затем нажать правую клавишу компьютерной мыши. После этого откроется экран настройки параметров прибора Plot, далее выбрать режим Axis (Оси), подобрать для удобства просмотра цифровые значения по осям X и Y, что необходимо для переноса в отчет изображения формы последовательностей кода Баркера (рис. 2.7). После выполнения настройки изображения скопировать его в отчет. По умолчанию в программе установлен 11-битный код Баркера. По описанной выше методике исследовать форму и занести данные в отчет и по другим кодам Баркера длиной три, четыре, пять, семь бит.

Для перестройки этого параметра подвести курсор к блоку (7) (см. рис. 2.6), нажать правую клавишу мыши.

В окне, которое появится после этого, в строке параметра Sequence Length поставить последовательно значения три, четыре, пять, семь бит и действовать согласно методике, описанной выше, подбирая необходимый для просмотра масштаб по осям X и Y.

Занести все полученные данные в отчет, сделать выводы.

5. Выйти из программы, выключить компьютер.

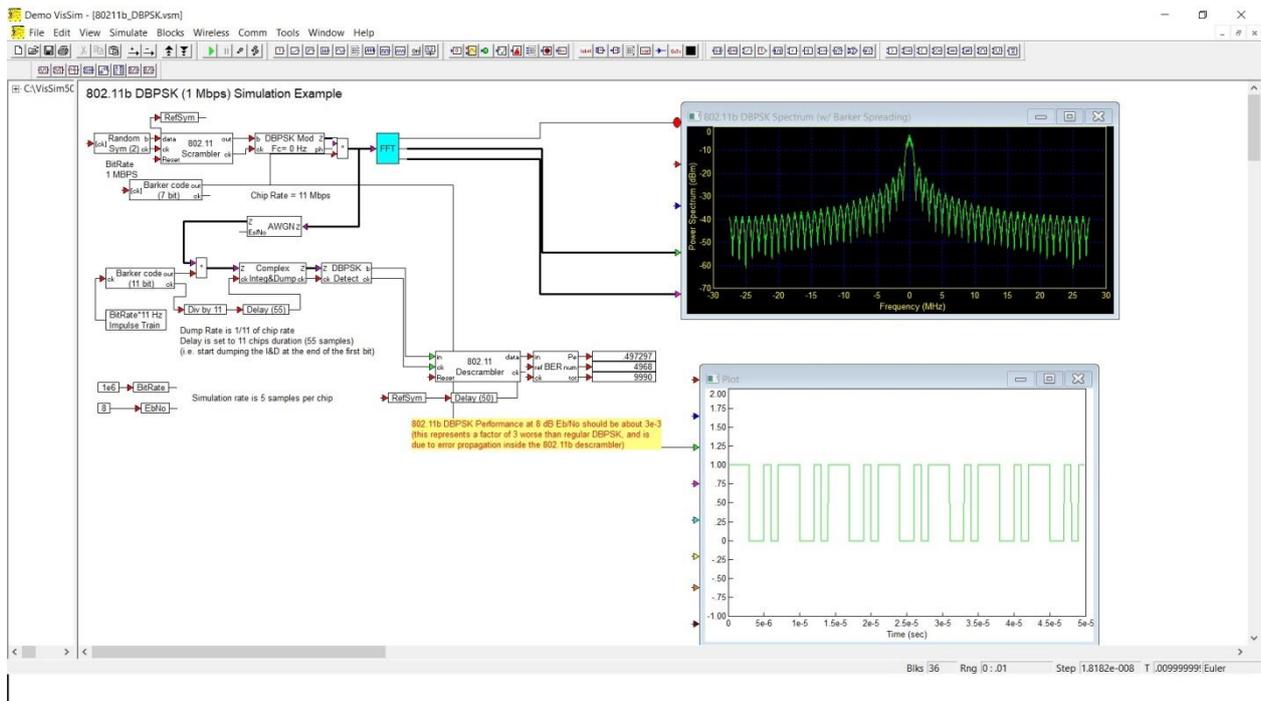


Рис. 2.7. Внешний вид лабораторной панели при исследовании формы кода Баркера длиной семь бит в составе оборудования стандарта IEEE 802.11b DBPSK

### 2.3. Содержание отчета

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы установок для исследования источников сигнала.
2. Полученные графические зависимости.
3. Выводы по проделанной работе.

### 2.4. Контрольные вопросы

1. Опишите свойства и особенности формирования M-последовательностей.
2. Поясните измерения при исследовании файла PN Sequence.
3. Опишите свойства и особенности формирования последовательностей Walsh.
4. Поясните измерения при исследовании файла Walsh.

5. Поясните свойства и особенности измерений при исследовании последовательностей Баркера.

6. Опишите особенности построения лабораторной панели при исследовании функционирования стандарта IEEE 802.11b (Wi-Fi), в котором используется дифференциальная бинарная фазовая манипуляция (DBPSK) и код Баркера.

## Практическая работа № 3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**Цель работы:** исследовать характеристики функциональных устройств для инфокоммуникационных систем.

### 3.1. Функциональные устройства и блоки для инфокоммуникационных систем.

#### Краткие теоретические сведения

Наиболее распространенными функциональными устройствами для инфокоммуникационных систем являются усилители, аттенюаторы, направленные ответвители, нелинейные смесители, ключи и т. д.

В программе VisSim 5.0 рассмотрен усилитель, который характеризуется следующими параметрами [16]: коэффициентом усиления, который имеет размерность в децибелах, коэффициентом шума, который имеет размерность в децибелах, и рядом других параметров.

На рис. 3.1 представлены результаты исследования рассматриваемого усилителя – блока (4). На графопостроителе (9) представлена амплитудная характеристика усилителя. Анализ данных показывает, что момент времени, равный приблизительно 0,007 с, примерно соответствует переходу в нелинейный режим работы. Выходное напряжение усилителя равно приблизительно 1,1 В. Форма входного сигнала усилителя (4) наблюдается с помощью виртуального осциллографа (10) и спектр – с помощью виртуального анализатора спектра (11). Блок (3) объединяет два синусоидальных колебания разной частоты с генераторов (1) и (2). Блок (5) используется для запуска анализатора спектра (6).

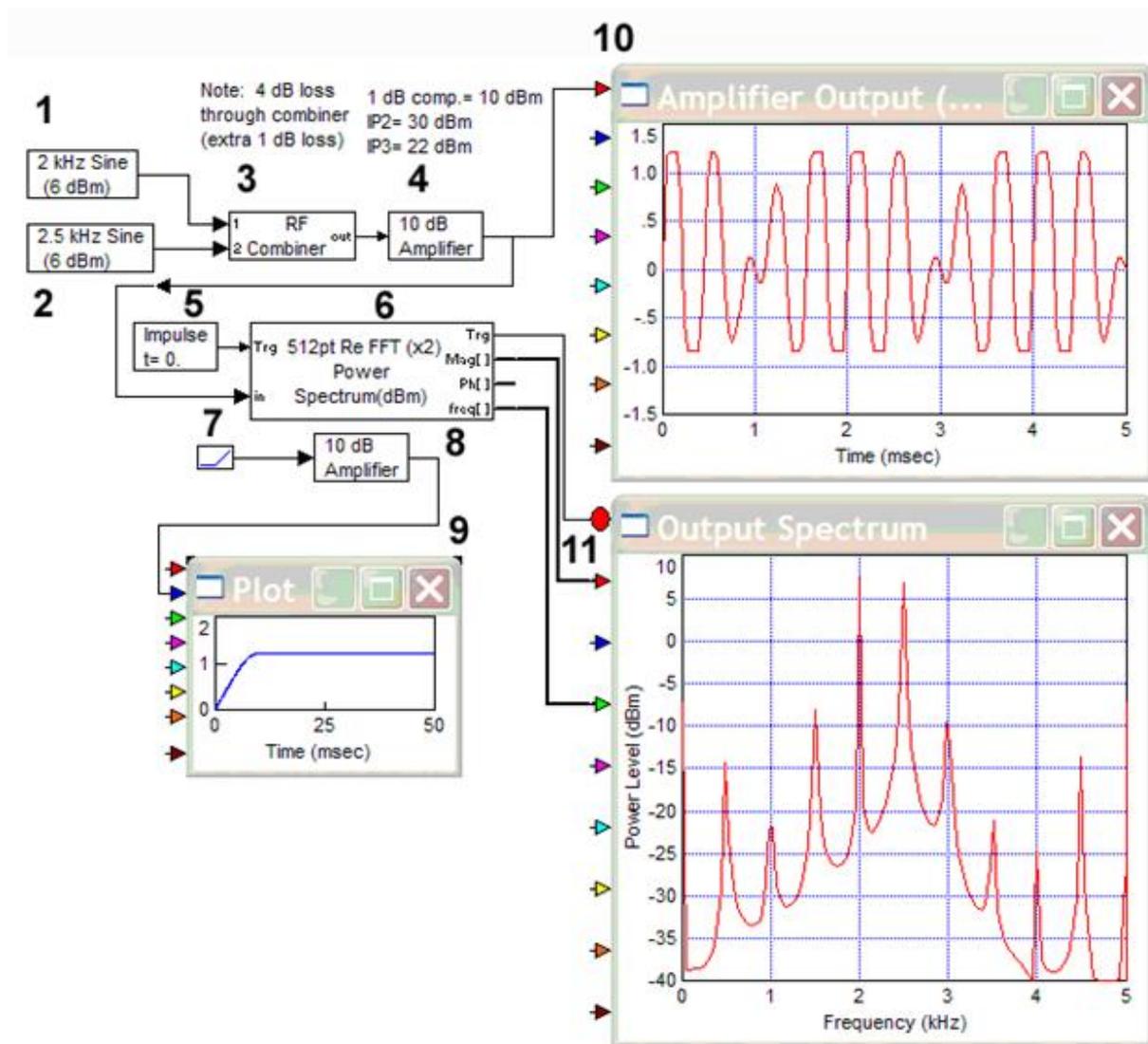


Рис. 3.1. Исследование высокочастотного усилителя

Другим рассматриваемым устройством является двойной балансный смеситель (Double Balanced Mixer), который характеризуется следующими параметрами. Параметр потери преобразования Conversion Loss (измеряется в децибелах) определяет, насколько сигнал промежуточной частоты уменьшается по отношению ко входному радиочастотному сигналу. Уровень сигнала гетеродина представлен параметром LO Power (дБм). Уровень сигнала на входе обозначается как RF (дБм).

Важное значение для усилителей, расположенных на входе приемного тракта, имеет коэффициент шума (Noise Figure), который должен составлять ми-

нимальную величину. Для современных микросхем и транзисторов величина коэффициента шума может составлять 0,5–0,6 дБ. Для добавки аддитивного белого шума в программе к передаваемым сигналам необходимо использовать опцию Add Noise.

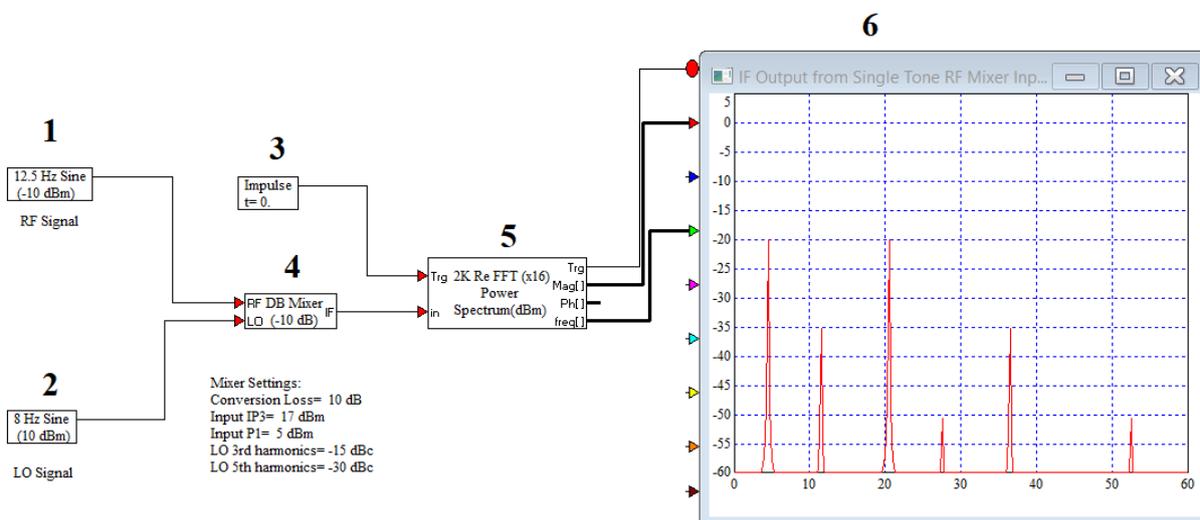


Рис. 3.2. Исследование двойного балансного смесителя (Double Balanced Mixer)

Исследование особенностей работы двойного балансного смесителя показано на рис. 3.2. Балансные смесители широко используются в радиоэлектронных схемах для построения трактов передачи и приема в качестве устройств, которые позволяют получить на используемых нелинейных элементах комбинационные продукты преобразования. При последующей фильтрации выходного сигнала можно получить необходимый сдвиг несущей частоты вниз или вверх по диапазону в зависимости от того, в каком направлении производится преобразование частоты.

Источник радиочастоты представлен генератором синусоидального сигнала (1) с частотой 12,5 Гц, в качестве гетеродина работает генератор (2) с частотой 8 Гц.

Спектр смесителя можно наблюдать на экране плоттера (6) (IF Output). Запуск анализатора спектра (5) производится источником одиночного импульса (3).

Основной параметр «Потери преобразования» для данной схемы равен 10 дБ.

Высокочастотный направленный ответвитель (Coupler) – это устройство, которое позволяет сформировать два выхода одного сигнала с разным уровнем (рис. 3.3).

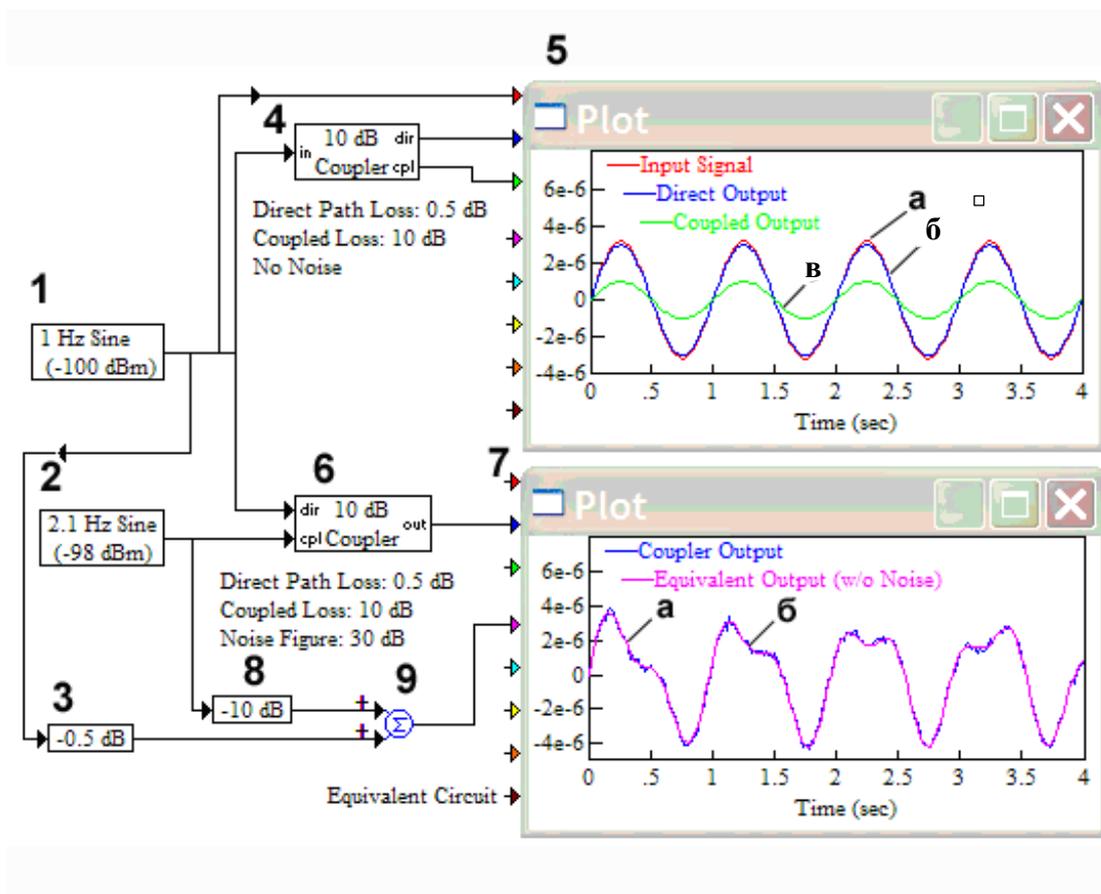


Рис. 3.3. Исследование направленного ответвителя (Coupler)

Высокочастотный направленный ответвитель широко используется в конструкции современных устройств, например, сотовых телефонов, передатчиков базовых станций и т. д. и обычно располагается на выходе передающего тракта между антенной и выходным каскадом передатчика. Сигнал с основного выхода обычно подается на антенну.

С помощью дополнительного выхода можно организовать контроль и регулировку уровня передатчика посредством внедрения, например, систем автоматического контроля усиления и реализации других функций. Обычно главными параметрами этого устройства являются прямые потери (Direct Path Loss)

и потери на втором, дополнительном выходе (Coupled Output). На рис. 3.3 эти потери равны соответственно 0,5 и 10 дБ без наличия белого шума.

Результаты испытания рассматриваемого направленного ответвителя показаны на рис. 3.3. На верхнем плоттере (5) представлены изображения трех сигналов. Первый сигнал (осциллограмма а – входной сигнал (Input Signal)) представляет собой сигнал с выхода генератора (1), который прямо подается на плоттер (5). Второй сигнал (осциллограмма б – прямой выход (Direct Output)) формируется при передаче сигнала с генератора (1) в прямом направлении через аттенюатор (4) с ослаблением 0,5 дБ. Третий сигнал (осциллограмма в – дополнительный выход (Coupled Output)) формируется с дополнительного выхода (cpl) направленного ответвителя (4). Уровень этого сигнала ослаблен на 10 дБ. На нижнем плоттере (7) представлена кривая (осциллограмма а – сигнал (Coupler Output)), полученная в режиме Input Coupling. Она формируется на выходе направленного ответвителя (6). Эта кривая практически совпадает с осциллограммой б сигнала Equivalent Output. Для формирования последнего сигнала используется генератор (1), обеспечивающий сигнал с частотой 1 Гц и уровнем 100 дБм, который затем подается через аттенюатор (3) с ослаблением в 0,5 дБ на первый вход сумматора (9). На второй вход сумматора (9) подается сигнал с генератора (2) с частотой 2,1 Гц и уровнем 98 дБм через аттенюатор (8) с ослаблением в 10 дБ.

На рис. 3.4 представлена схема, которая предназначена для исследования работы системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Она состоит из следующих блоков. Блок 1 является источником сигнала с модуляцией ОФМ-2 (BPSK). Блок 2 представлен каналом с аддитивным белым шумом (AWGN). Низкочастотные фильтры (4) и (8) предназначены для фильтрации сигнала. Функциональные устройства (3), (5) и (10) предназначены для преобразования формы сигнала. Фазовый детектор представлен блоком (7).

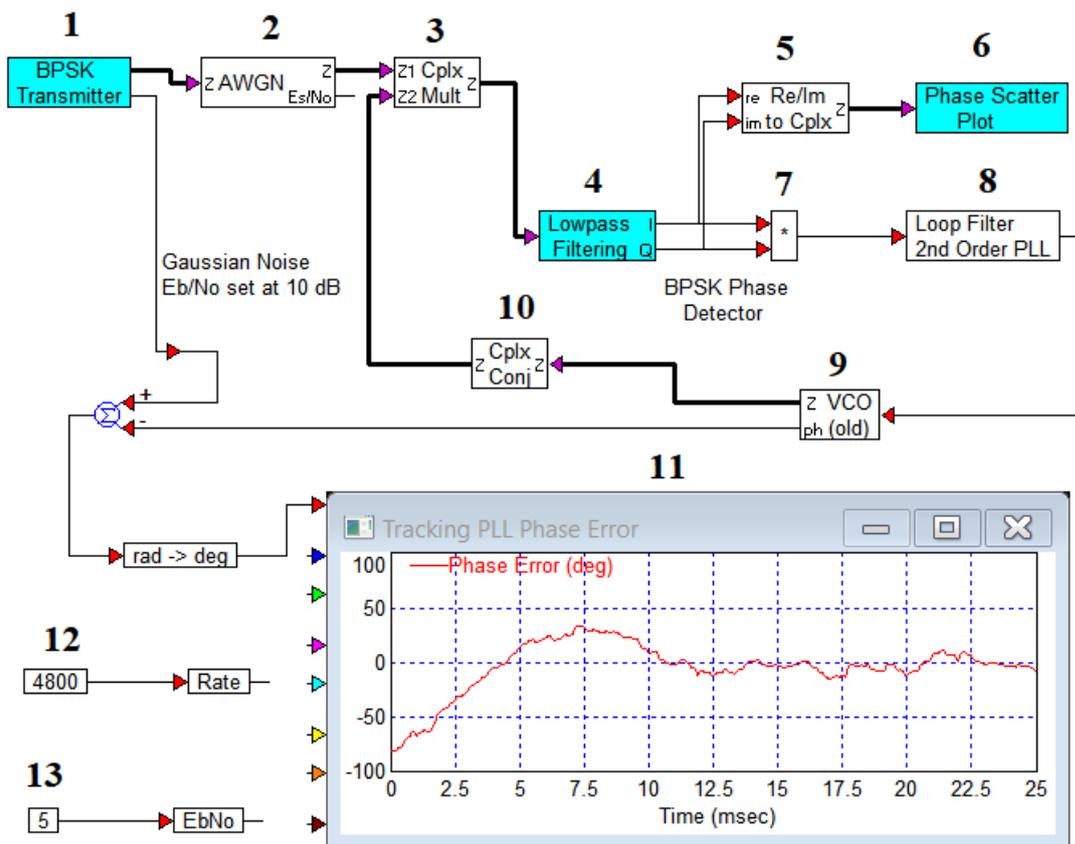


Рис. 3.4. Исследование работы системы фазовой автоподстройки частоты

Генератор, управляемый напряжением (ГУН, или VCO), обозначен как блок (9). Плоттер (11) предназначен для показа зависимости изменения фазы сигнала на выходе VCO по отношению к фазе входного сигнала. Блок (12) предназначен для регулировки скорости цифрового потока, а блок (13) – для регулировки отношения сигнал/шум в тракте.

### 3.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера.

2. В меню File выбрать опцию Open. На диске C открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, RF. Далее выбрать файл Amplifier. Данный

пример позволяет исследовать характеристики нелинейного усилителя в различных частотных диапазонах.

Подвести курсор к полю «10 dB Amplifier» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить настройки усилителя: коэффициент усиления (Gain) (измеряется в децибелах), коэффициент шума (Noise Figure) (измеряется в децибелах), если выбрана опция «Добавить шум» (Add Noise), то коэффициент сжатия выходного сигнала – «1 dB Compression (Output)» (дБм), параметры Output IP2, Output IP3, Output IP4 (дБм), смещение выходного сигнала – Output Bias (положительное или отрицательное). Записать в отчет значения этих параметров. Нажать кнопку Enter.

Подвести курсор к полю «512 pt Re FFT(x2) Power Spectrum dB» – блоку, который позволяет исследовать выходной спектр усилителя, и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить настройки анализатора спектра: режим работы (Trigger Mode) – непрерывный (Continuous) или ждущий (прерывистый) (Triggered), особенности выходной спектральной характеристики (Spectral Output) – Mag/Phase, тип оконного режима работы – FFT Windows Type, вид нагрузки – Load и другие параметры. Нажать кнопку Enter.

Подвести курсор к полю сумматора сигнала RF Combiner и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить настройки блока, объединяющего выходы двух генераторов гармонического сигнала «2 kHz Sine» и «2,5 kHz Sine». Подвести курсор к этим полям и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать в отчет параметры и характеристики этих блоков: частоту, выходной уровень и другие параметры.

Используется три плоттера, на которые выводятся форма выходного сигнала (Amplifier Output – Time Domain), выходной спектр (Output Spectrum) и амплитудная характеристика (Plot). Для настройки плоттеров или многофункциональных графопостроителей подвести курсор к указанным устройствам и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. На панели Options включены параметры со следующими значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы),

X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии).

Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – цифровое значение, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – цифровое значение, X Upper Bound (верхняя граница по X) – цифровое значение, X Lower Bound – цифровое значение (нижняя граница по X), Time Scaling (масштаб времени) – цифровое значение, Sub Plot Count – 1 (указатель количества дополнительных рабочих областей). Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому подробно они не рассмотрены. Для устранения полученного изображения необходимо снова войти в Plot Properties, на панели Options нажать Clear Overplot, а затем Enter.

Запуск программы осуществляется кнопкой ПУСК или на клавиатуре клавишей F5. Зарисовать или распечатать полученное изображение характеристик сигнала при настройках блоков, установленных по умолчанию.

Исследовать форму сигнала при других начальных параметрах, которые задаются в окнах «2 kHz Sine» и «2,5 kHz Sine», изменяя параметры генераторов «2 kHz Sine» и «2,5 kHz Sine». Исследовать форму и спектральную характеристику выходного сигнала для значений частоты генератора «2 kHz Sine», равных 4 и 5 кГц, зафиксировав значение частоты генератора «2,5 kHz Sine» равным 2,5 кГц. Исследовать форму и спектральную характеристику выходного сигнала для значений частоты генератора «2,5 kHz Sine», равных 5 и 7,5 кГц, зафиксировав значение частоты генератора «2 kHz Sine» равным 2 кГц. В меню File выбрать команду Close.

3. В меню File выбрать опцию Open. Открыть в папке RF файл Double Balanced Mixer. Данный пример позволяет исследовать характеристики нелинейного преобразователя в различных частотных диапазонах. Как и в предыдущем примере, необходимо подвести курсор к полям источников сигнала, плоттеру и

другим блокам схемы. Записать установки этих блоков и приборов. Запуск программы осуществляется кнопкой ПУСК или клавишей F5 на клавиатуре. Зарисовать или распечатать полученное изображение характеристик сигнала при настройках блоков, установленных по умолчанию.

Исследовать форму сигнала и при других начальных параметрах, задаваемых окнами «12,5 Hz Sine» и «8 Hz Sine». Исследовать форму и спектральную характеристику выходного сигнала для значений частоты генератора «8 kHz Sine», равных 10 и 12 кГц, зафиксировав значение частоты генератора «12,5 kHz Sine» равным 12,5 кГц. Исследовать форму и спектральную характеристику выходного сигнала для значений частоты генератора «12,5 kHz Sine», равных 15 и 17,5 кГц, зафиксировав значение частоты генератора «8 kHz Sine» равным 8 кГц. В меню File выбрать команду Close.

4. В меню File выбрать опцию Open. Открыть в папке RF файл Coupler. Данный пример позволяет исследовать характеристики направленного ответвителя. Как и в предыдущем примере, необходимо подвести курсор к полям источников сигнала, сумматору сигнала, плоттеру и другим блокам схемы. Записать установки этих блоков и приборов. Запуск программы осуществляется кнопкой ПУСК или на клавиатуре клавишей F5. Зарисовать или распечатать полученное изображение характеристик сигнала при настройках блоков, установленных по умолчанию.

Исследовать форму сигнала при других начальных параметрах, задаваемых в окнах «1 Hz Sine» и «2,1 Hz Sine». Исследовать форму и спектральную характеристику выходного сигнала для значений частоты генератора «1 kHz Sine», равных 3, 6, 9 кГц, зафиксировав значение частоты генератора «2,1 kHz Sine» равным 2,1 кГц. Записать установки этих блоков и приборов. Зарисовать или распечатать полученное изображение. Сделать выводы. В меню File выбрать опцию Close.

5. В меню File выбрать опцию Open. Открыть в папке PLL файл Loop\_Filter\_PLL2. Данный пример позволяет исследовать характеристики канала с

ОФМ-2 (BPSK) и, в частности, определить величину фазовой ошибки в цепи фазовой автоподстройки (PLL). Подвести курсор к полям источников сигнала, канала AWGN, блокам Lowpass Filtering, Phase Scatter Plot, Loop Filter 2 nd Order PLL и другим блокам схемы. Записать значения параметров этих блоков и приборов. Зарисовать общую схему тракта и схемы отдельных блоков, в частности блока Lowpass Filtering. Запуск программы осуществляется кнопкой ПУСК или на клавиатуре клавишей F5.

Исследовать характеристики тракта при различных значениях отношения сигнал/шум (параметр  $E_b/N_o$ ), который устанавливается в канале AWGN. Установить значения  $E_b/N_o$  равными 2, 10, 30 дБ. Для дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, выбрав опцию Help. Зарисовать или распечатать полученные изображения на плоттерах Phase Scatter Plot и Tracking PLL Phase Error. Сделать выводы.

6. В меню File выбрать опцию Open. На диске C (или другом – по указанию преподавателя) открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, Signal Sources. Выбрать файл Freq\_Sweep. Исследовать генератор, у которого частота меняется в установленных границах. Подвести курсор к полю Frequency Sweep Signal и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить настройки Plot Properties многофункционального графопостроителя (Plot), который в данном примере имеет название Frequency Sweep Signal. На панели Options включены параметры со следующими значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы), X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии).

Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – 3, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – -3, X Upper Bound (верхняя граница по X) – 10, X Lower Bound (нижняя граница по X) – 0, Time Scaling (масштаб времени) – MilliSeconds (миллисекунды), Sub Plot

Count – 1 (указатель количества дополнительных рабочих областей). Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому здесь подробно не рассмотрены. Для устранения полученного изображения необходимо снова войти в Plot Properties, на панели Options нажать Clear Overplot, а затем Enter.

Проверить настройки источника сигнала Freq\_Sweep. Подвести курсор к полю Freq Sweep и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Появится контрольное окно Frequency Sweep Properties. Проверить установку параметров: Start frequency – 1000 Hz, Stop frequency – 10 000 Hz, Sweep Duration – 0,005 sec, Amplitude – 1 V, Initial Phase – 0 deg. Нажать кнопку Cansel, если параметры сигнала не изменялись, или кнопку Enter (при изменении параметров). Запуск программы осуществляется кнопкой ПУСК или на клавиатуре клавишей F5.

Проанализировать полученное изображение сигнала, у которого частота меняется от 1000 до 10 000 Гц, а амплитуда остается постоянной и равной 1 В. Зарисовать или распечатать полученное изображение. Исследовать форму сигнала при других начальных параметрах, задаваемых окном Frequency Sweep Properties. Эти данные выбрать самостоятельно и получить еще два или три изображения сигнала сложной формы. В меню File нажать кнопку Close.

7. В меню File выбрать опцию Open. В папке Comm Examples открыть файл Spectrum Analyzer. Данный пример позволяет исследовать спектр псевдослучайной последовательности, которая задается источником «511 PN Sequence» в условиях действия внешнего шумового сигнала. Подвести курсор к полю «511 PN Sequence» (псевдослучайная последовательность размером  $2^n - 1 = 2^9 - 1 = 511$ ) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать значение параметров Shift Register Size, Sequence Offset, Initial State. Подвести курсор к полю «Noise – 10 dBm/Hz» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать значения следующих параметров: Loads (нагрузка) – 50 Ом, Noise Units (размерность шумового сигнала) – dBm/Hz, Noise Density – 10 dBm/Hz. Подвести

курсор к источнику гармонического сигнала, обозначенному символом ~, и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать параметры гармонического сигнала – частоту, амплитуду и время задержки. Нажать кнопку ПУСК. На первом этапе наблюдать процесс длительного изменения спектра сигнала на анализаторе спектра Spectrum Analyzer Display of a Baseband BPSK Signal. При этом загорается красный индикатор, обозначенный символом || (Stop – остановка), в верхней части экрана, где расположены функциональные клавиши. Дождаться окончания процесса, о чем будет свидетельствовать выключение индикатора || (Stop) и включение индикатора ПУСК. Значение параметра T (условное время), расположенного в правом нижнем углу экрана монитора, при этом будет равно 2000.

Повторно несколько (три или четыре раза) запустить программу, нажимая кнопку ПУСК. Однако при этих повторных запусках останавливать выполнение программы в произвольное время, нажимая клавишу || (Stop). Например, остановить программу при времени T, равном приблизительно 500, 1000, 1500. Записать точное значение времени T. Зарисовать и проанализировать полученные изображения сигнала в разных временных точках. Для дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help.

Изменить параметры шумового сигнала. Для этого подвести курсор к полю «Noise – 10 dBm/Hz» и после появления значка  нажать правую клавишу мыши. Установить значения параметра Noise Density равным 100 dBm/Hz, таким образом значительно уменьшить уровень шумового сигнала. Нажать кнопку ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученные изображения сигнала в разные значения времени T. Сравнить осциллограммы сигналов при уровне шумов с уровнем –10 dBm/Hz и –100 dBm/Hz. Для дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help. В меню File выбрать кнопку Close.

8. Открыть и просмотреть файлы Splitter/Combiner.vsm, Attenuator.vsm, RF Switch.vsm, которые имитируют работу разных блоков телекоммуникационных

систем. Для дополнительной информации о каждом из блоков можно воспользоваться помощью, нажав кнопку Help.

9. Сделать выводы. Выйти из программы, выключить компьютер.

### **3.3. Содержание отчета**

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы исследованных источников сигнала.

2. Полученные графические зависимости.

3. Выводы по проделанной работе.

### **3.4. Контрольные вопросы**

1. Поясните назначение и особенности работы усилителя, полученные при работе с файлом Amplifier.

2. Поясните назначение и характеристики смесителя, полученные при работе с файлом Double Balanced Mixer.

3. Поясните назначение и особенности работы направленного ответвителя, полученные при работе с файлом Coupler.

4. Поясните назначение и особенности работы переключателя сигнала, полученные при работе с файлом RF Switch.

5. Поясните особенности работы исследованной схемы тракта, полученные при работе с файлом Loop\_Filter\_PLL2.

6. Поясните назначение и особенности настройки многофункционального графопостроителя, полученные при работе с файлом Freq\_Sweep.

7. Поясните измерения при работе с анализатором спектра (файл Spectrum Analyzer).

## Практическая работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЯТОРОВ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ

**Цель работы:** изучить характеристики и особенности работы модуляторов и демодуляторов, используемых в инфокоммуникационных системах.

#### 4.1. Особенности построения модуляторов и демодуляторов, используемых в инфокоммуникационных системах

Функционирование любой инфокоммуникационной системы невозможно представить без операций модуляции и демодуляции несущего информационного сигнала (обычно низкочастотного), который формируется в абонентских устройствах, применяемых, например, для передачи речевых телефонных сообщений. Наиболее известны традиционные виды модуляции: амплитудная, частотная, фазовая, при этом разработано много их версий и частных вариантов.

При выборе способа модуляции следует учитывать противоречивость ряда их технических параметров. Например, любой вид модуляции должен обеспечивать необходимую достоверность передачи. Но это требование вступает в противоречие с необходимостью обеспечить высокую спектральную эффективность, т. е. с экономией частотного ресурса. Известно, что, с одной стороны, качество передачи улучшается с расширением спектра сигнала. С другой стороны, необходимость улучшить абонентскую емкость, параметры электромагнитной совместимости и удельной скорости передачи, наоборот, ведет к рациональному использованию частотного ресурса.

Основные классы модуляционных форматов определяются главными параметрами сигнала – амплитудой, частотой и фазой. АМ – амплитудная модуля-

ция, ЧМ – частотная модуляция, ФМ – фазовая модуляция. ЧМ и ФМ часто объединяют в один вид и называют угловой модуляцией.

Амплитудная модуляция известна с 1906 г., а с 1920 г. она стала основной в системах радиовещания. Разработаны разновидности АМ: с одной боковой полосой (с 1915 г.) и полярной модуляцией (СССР, 1939 г., США, 1961 г.), которые использовались в системе стереофонического радиовещания.

Частотная модуляция была изобретена в 1902 г., но широкое распространение получила лишь в 1940-х гг. в системах подвижной, радиорелейной и спутниковой связи, а также в стереофоническом радиовещании.

Фазовая модуляция была разработана в 1928 г., но долгое время не находила применения из-за проблем восстановления на приеме опорного колебания, которое должно быть синфазно с несущей частотой принимаемого сигнала [20]. Только после проведения длительных научных исследований и получения устойчивого синхронного приема сигналов ФМ началось широкое использование этого вида модуляции в виде ОФМ (относительной фазовой модуляции).

Самыми простыми видами фазовой модуляции являются бинарная фазовая манипуляция – БФМ (в англоязычной литературе BPSK – Binary Phase Shift Keying) и квадратурная ФМ (КФМ) (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying). При формировании БФМ значения фазы принимают две возможных величины – 0 или 180°. При реализации КФМ значения фазы равняются 0, 90, 180, 270°. Эти виды модуляции являются наиболее помехоустойчивыми при цифровой связи, так как характеризуются расположением векторов сигнала на фазовой диаграмме, которые максимально удалены друг от друга (рис. 4.1, а, б). Частотный ресурс при БФМ и КФМ используется неэффективно, так как спектр выходного сигнала убывает с частотой очень медленно.

Использование так называемой офсетной КФМ, или КФМ со сдвигом на 45°, скорость передачи не увеличивает, но незначительно повышает помехоустойчивость системы связи (рис. 4.1, в).

В стандарте GSM используется один из вариантов минимальной частотной манипуляции – гауссовская МЧМ (GMSK – Gaussian MSK). При МЧМ амплитуда постоянна и, следовательно, процесс не сопровождается амплитудной модуляцией. Пик-фактор сигнала равен единице, обеспечивается оптимальная работа усилителя мощности передатчика. Особенностью спектральной характеристики МЧМ является бóльшая компактность по сравнению со стандартной КФМ и другими видами модуляции. Гауссовская МЧМ реализуется так, что входной поток с длительностью одного бита  $T_b$  передается через низкочастотный фильтр. Этот фильтр имеет гауссовскую амплитудно-частотную характеристику. Его полоса, параметр  $B$ , измеряется на уровне  $-3$  дБ. В стандарте GSM зафиксировано значение параметра  $B \cdot T_b = 0,3$ .

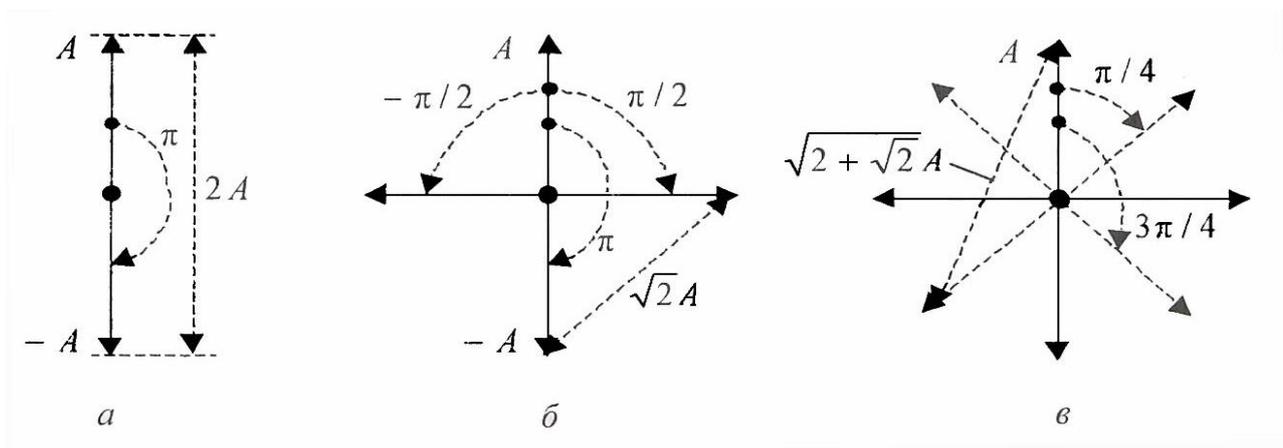


Рис. 4.1. Типы модуляционных форматов при использовании фазовой модуляции:  
 $a$  – БФМ;  $b$  – КФМ;  $v$  – офсетная КФМ

Широкое распространение получили квадратурные амплитудные модуляторы (КАМ-N, QAM-N, NQAM) [20]. При формировании КАМ, в отличие от ФМ, изменяется не только величина фазы, но и амплитуда вектора сигнала, как показано на рис. 4.2 для КАМ-16.

На рис. 4.3 показано исследование особенностей фазовой диаграммы при формировании КАМ-16 модуляции при использовании программы VisSim.

На этом рисунке изображены: генератор псевдослучайных сигналов (1), модулятор КАМ (QAM) сигналов (2), низкочастотный фильтр с характеристикой Чебышева (3), эквалайзер, т. е. специальное устройство для коррекции амплитудно-частотной характеристики (4), плоттеры для наблюдения фазовых диаграмм (5) и (6). Различие между диаграммами (5) и (6) заключается в том, что при построении диаграммы (6) используется специальная обработка фазового сдвига, которая согласуется со значением фазы в идеальной диаграмме.

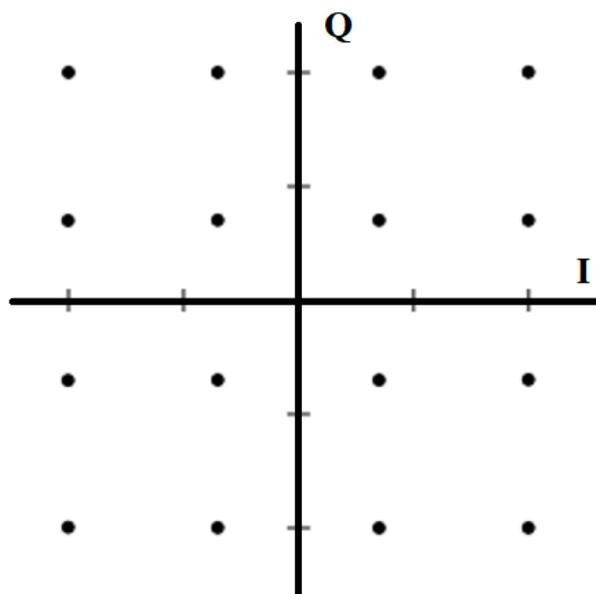


Рис. 4.2. Идеальная фазовая диаграмма при формировании КАМ-16 модуляции

Использование КАМ (QAM) в современных системах связи позволяет реализовать значительные скорости передачи. Так, например, в стандарте сотовой связи LTE для организации скорости передачи 100 Мбит/с в направлении от базовой станции к мобильной станции необходимо применение КАМ-64 в сочетании с другими техническими решениями, где цифра 64 означает количество положений вектора или количество точек в фазовой диаграмме.

Однако при использовании QAM сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с уменьшением помехоустойчивости при увеличении скорости. Это

связано с уменьшением расстояния между точками фазовой диаграммы, и, соответственно, с ошибочным воспроизведением фазы сигнала.

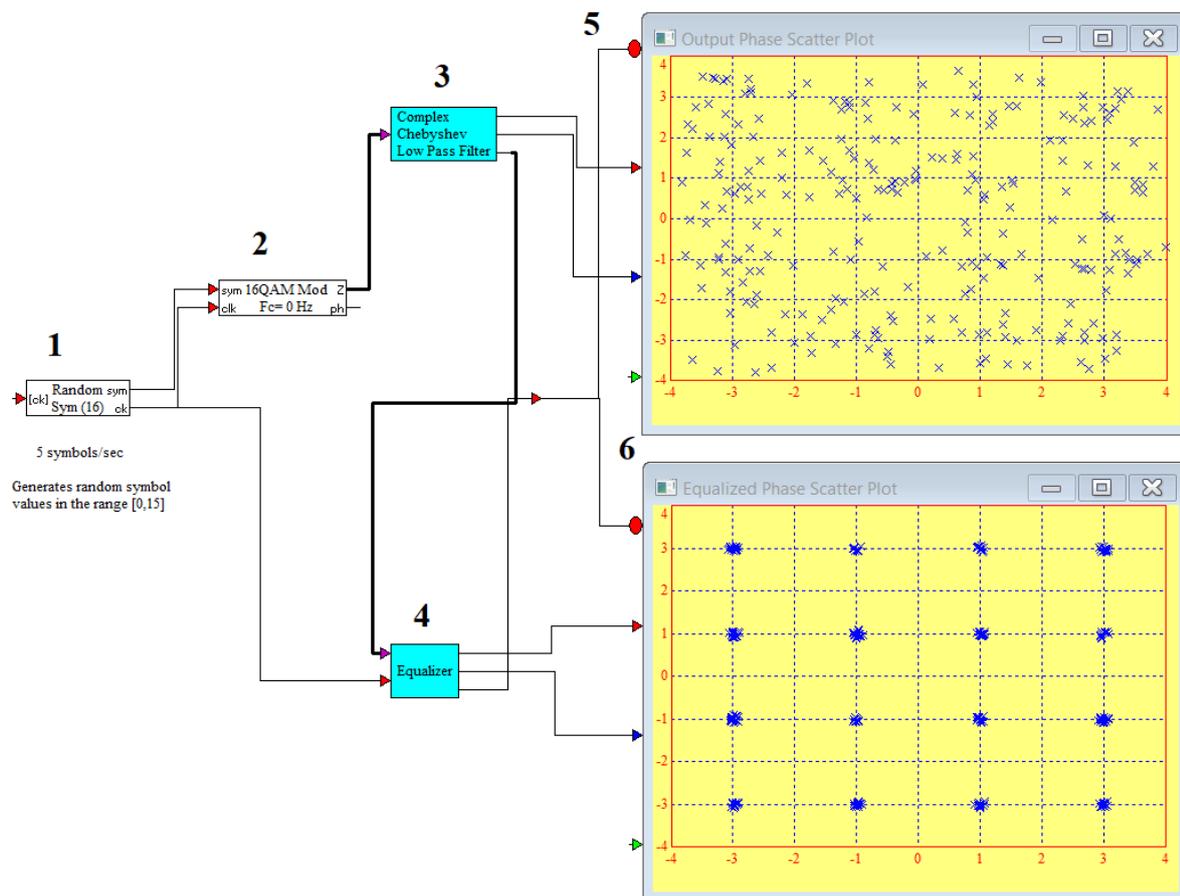


Рис. 4.3. Исследование особенностей фазовой диаграммы при формировании КАМ-16 модуляции

Отмеченная особенность многопозиционных видов модуляции заставляет разработчиков систем радиосвязи корректировать энергетические параметры и характеристики радиолиний, увеличивая, например, уровень выходной мощности передатчиков, или повышая чувствительность приемников, или уменьшая расстояния между объектами связи, что сокращает зону работы оборудования.

## 4.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера.

В меню окна File выбрать опцию Open. На диске C (или другом – по указанию преподавателя) открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, Demodulators и затем загрузить файл DQPSK\_Demodulators. Таким образом, для анализа выбирается схема, с помощью которой можно исследовать различные виды цифровых модуляций. По умолчанию в примере выбран вид модуляции DQPSK – дифференциальная квадратурная фазовая модуляция (манипуляция).

Изучить и зарисовать исследуемую схему. Подвести курсор к полю Random Sym (генератор многоуровневого импульсного сигнала) (4) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать в отчет параметры генератора, заданные по умолчанию: Number of Symbols (число символов) – 4, Timing – Internal (внутренний запуск), Symbol Rate (символьная скорость) – 9600 бит/с, Start Time (время старта) – 0 с. Нажать кнопку Cancel, если параметры сигнала не изменялись, или кнопку Enter при изменении параметров.

Подвести курсор к блоку DQPSK Mod – модулятору, обеспечивающему дифференциальную квадратурную фазовую модуляцию, и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить настройки этого блока. По умолчанию установлены значения следующих параметров: Carrier Frequency (частота несущей) – 0 Гц, Amplitude (амплитуда) – 1 В, Initial Phase (начальная фаза) – 0°, Gain Imbalance – 0 дБ, Phase Imbalance (дисбаланс фазы) – 0°, Phase Output Mode (мода выходной фазы) – Wrapped (ограниченная) (0, 2π). Записать эти и другие параметры модулятора.

Подвести курсор к блоку AWGN, который имитирует работу канала связи с равномерным белым шумом. После появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать в отчет параметры канала, заданные по умолчанию: Number of Runs (количество прогонов) – 1, Symbol Rate (символьная скорость) – 9600 Гц,

Ref. Av. Complex Signal Power (усредненная средняя мощность) – 1 Вт,  $E_s/N_0$  – отношение сигнал/шум для первого пробега – 15 дБ, Ref. Power Unit (размерность опорной мощности) – ватт на 1 Ом.

Подвести курсор к блоку DQPSK Detect – демодулятору передаваемого сигнала. Проверить тип цифровой модуляции, которая установлена в этом блоке. По умолчанию должна быть установлена DQPSK, а начальная фаза (Initial Phase) равна  $0^\circ$ . Для того чтобы узнать назначение остальных блоков в схеме, подведите к исследуемому блоку курсор и нажмите правую кнопку мыши, а затем для получения справки кнопку Enter. Блок задержки Delay обеспечивает задержку в прохождении сигнала, эквивалентную той, которая реализуется в блоке AWGN. Величину задержки можно регулировать, если подвести к исследуемому блоку курсор и нажать правую кнопку мыши. Далее в открывшемся окне можно выставить необходимую величину задержки. Опция Delay Mode (вид задержки) позволяет осуществлять различные варианты отсчета величины задержки сигнала.

Запустить программу кнопкой ПУСК, расположенной в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре кнопку F5. Проанализировать полученные изображения сигнала на трех плоттерах: TX Constellation, Rx Phase Scatter Plot, Received vs Original Data. Две первые диаграммы позволяют получить фазовые диаграммы – идеальную (с изображением траекторий перехода фазы) и реальную, которая формируется при условии прохождения сигнала через реальный канал с равномерным белым шумом. Этот канал представлен блоком AWGN. Для устранения полученного изображения необходимо подвести курсор к изображению плоттера, где представлен рисунок, нажать правую кнопку мыши, войти в Plot Properties (свойства рисунка), на панели Options нажать Clear Overplot (очистить изображение). В дальнейшем перед запуском программы необходимо всегда нажимать кнопку Clear Overplot, стирая тем самым предыдущее изображение.

Изменить отношение сигнал/шум для блока AWGN, т. е. установить его равным 5 дБ. Запустить программу кнопкой ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученные кривые. Аналогичные измерения произвести при отношении сигнал/шум 30 дБ. Сделать выводы.

Выбрать для блоков DQPSK Mod и DQPSK Detect другой тип модуляции – D8PSK – восьмиуровневую относительную фазовую манипуляцию. Повторить измерения для трех уровней отношения сигнал/шума в канале при 5, 15, 30 дБ. Зарисовать и проанализировать полученные кривые. Сделать выводы. В меню File нажать кнопку Close.

2. Перейти к исследованию цифровых модуляторов. В папке VisSim Modulators выбрать файл PSK Modulator. Записать значения параметров блоков «63 PN Sequence» (источник псевдослучайного сигнала), BPSK Mod (модулятор), AWGN (канал с равномерным белым шумом), Receiver (приемник), PLL Acquisition Plot (плоттер для отражения характеристик цепи подстройки фазы), Reference Data (опорные данные). Зарисовать и проанализировать состав трех последних блоков.

Запустить программу кнопкой ПУСК. Зарисовать полученные рисунки на всех трех плоттерах в отчет, сделать их анализ. Повторить измерения для трех уровней отношения сигнал/шум в канале при 30, 15, 5 дБ. Зарисовать и проанализировать полученные кривые. Сделать выводы. В меню File нажать кнопку Close.

3. Открыть в папке COMM Example файл GSM\_GMSK, в котором рассмотрен пример реализации GMSK – гауссовской частотной манипуляции с минимальным сдвигом. Подвести курсор к полю «32767 PN Sequence» (генератор псевдослучайной последовательности) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать в отчет настройки этого блока. Аналогично исследовать и записать настройки остальных блоков.

Запустить программу кнопкой ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученные кривые на плоттерах GSM Signal and GSM Mask и GSM Time Domain Waveform. Первый плоттер позволяет исследовать спектр сигнала с выхода GSM-модулятора. Особенностью полученного изображения является спектральная маска GSM модулированного сигнала, которая налагается на собственный спектр сигнала. Записать установки анализатора спектра – блока «2K pt FFT(x10) Power Spectral Density». Сделать выводы.

На втором плоттере проанализировать временную форму сигнала с выхода GSM-модулятора. При необходимости детального исследования полученной кривой изменить настройки плоттера по оси X. Зарисовать и проанализировать полученные кривые. Сделать выводы. В меню File нажать кнопку Close.

4. Открыть файлы с примерами реализации квадратурной, амплитудной и частотной модуляции – QAM Modulator, AM Modulator, FM Modulator. Запустить программы кнопкой ПУСК. Зарисовать и проанализировать полученные кривые. Сделать выводы. Выйти из программы, выключить компьютер.

### **4.3. Содержание отчета**

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы исследованных блоков.
2. Полученные графические зависимости.
3. Выводы по проделанной работе.

### **4.4. Контрольные вопросы**

1. Опишите назначение и особенности квадратурной фазовой модуляции.
2. Опишите назначение и особенности модуляции D8PSK.
3. Опишите измерения при работе с файлом PSK Modulator.
4. Опишите измерения при работе с файлами AM Modulator и FM Modulator.
5. Поясните влияние отношения сигнал/шум канала AWGN при исследовании схемы в файле DQPSK\_Demodulators.
6. Опишите особенности формирования сигнала с гауссовской частотной манипуляцией с минимальным сдвигом.
7. Опишите измерения при работе с файлом QAM Modulator,

## Практическая работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОДЕРОВ И ДЕКОДЕРОВ СИГНАЛОВ

*Цель работы:* изучить характеристики и особенности функционирования кодеров и декодеров сигнала для инфокоммуникационных систем.

#### 5.1. Кодеры и декодеры сигнала для телекоммуникационных систем

Особенностью радиолиний по сравнению с кабельными линиями является повышенный уровень помех и искажений передаваемого сигнала. Это приводит при цифровой передаче данных к появлению ошибочных бит в приемнике. Помехоустойчивое канальное кодирование используется для обнаружения и исправления возникающих ошибок. Основной особенностью любого метода кодирования является введение избыточных бит в передаваемое сообщение. Для каждого сообщения из  $k$  информационных бит на выходе кодера с использованием некоторого алгоритма кодирования формируется кодовая группа длиной  $n$ , которое больше, чем  $k$  бит (символов) на входе. Добавление добавочных или проверочных бит приводит к снижению скорости передачи. Поэтому основная задача построения хорошего кода состоит в минимизации количества избыточных бит и достижении требуемого качества передачи.

Используются термины «обнаруживающие коды» и «корректирующие коды», когда в процессе работы пары кодер – декодер происходит обнаружение и коррекция ошибок. Все корректирующие коды делятся на блочные и непрерывные.

Блочные коды характеризуются тем, что последовательность передаваемых символов разделяется на блоки, для которых операции кодирования и декодирования производятся отдельно [20]. При использовании непрерывных кодов

первичная информационная последовательность символов непрерывно преобразуется по определенному закону в другую последовательность, в которой проверочные символы перемежаются с информационными. Поскольку формирование проверочных символов в таких кодах ведется по рекуррентным правилам (каждый очередной член определяется через предыдущие), то их часто называют цепными, или рекуррентными.

Блочные и непрерывные коды могут быть делимыми и неделимыми. В делимых кодах всегда можно выделить информационные и контрольные (проверочные) символы, которые являются избыточными и служат исключительно для коррекции ошибок. В неделимых кодах такое деление символов невозможно [16].

Наиболее многочисленный класс делимых кодов составляют линейные. Основная их особенность заключается в том, что контрольные символы образуются как линейные комбинации информационных. В свою очередь линейные коды могут быть разбиты на два подкласса: систематические и несистематические [16]. Все двоичные систематические коды являются групповыми и характеризуются принадлежностью кодовых комбинаций к группе, обладающей следующим свойством: сумма по  $\text{mod} = 2$  для любой пары комбинаций снова дает комбинацию, принадлежащую этой группе. Несистематические коды такими свойствами не обладают.

Среди систематических кодов наиболее известны циклические коды. Циклические коды обладают хорошими корректирующими свойствами, а реализация кодирующих и декодирующих устройств для таких кодов выполняется проще, чем для других систематических кодов.

В середине прошлого века были разработаны первые версии блочных кодов М. Дж. Голеем и Р. Хэммингом (США) и сверточных, или рекуррентных кодов, которые нашли широкое применение в современной технике связи [16]. Исследования, связанные с построением сверточных кодов и разработкой эффективных с вычислительной точки зрения алгоритмов их декодирования, заняли

почти 20 лет. Несмотря на то что сверточные коды являются частным случаем блочных линейных кодов, введение сверточной структуры наделяет их рядом дополнительных свойств, которые существенно облегчают декодирование [16]. Эти коды имеют древовидную или решетчатую структуру. Каждому ребру древовидной структуры соответствует определенная последовательность  $m$  информационных символов. По принятой последовательности символов для каждого ребра может быть найдена его метрика – число, характеризующее его расстояние до принятой последовательности. Для измерения этого расстояния может быть использована метрика Хэмминга, если в демодуляторе принимается жесткое решение (выходной код равен исходному), или евклидова метрика, если декодирование осуществляется по методу максимума правдоподобия. Декодирование сверточных кодов состоит в прослеживании по кодовой решетке того пути, для которого расстояние от принятой последовательности символов имеет минимальное значение. При этом сверточная структура кода позволяет использовать рекуррентные алгоритмы, существенно упрощающие вычисления этого расстояния [16].

Значительным достижением в области теории кодирования стала разработка в 1967 г. А. Витерби (США) весьма эффективного с вычислительной точки зрения алгоритма декодирования сверточных кодов по максимуму правдоподобия [16].

Этот алгоритм, в отличие от алгоритма последовательного декодирования, исследует все возможные пути по кодовой решетке на длине кодового ограничения  $k$ , поэтому он применим для декодирования сверточных кодов при сравнительно небольших значениях  $k = 1-10$ .

На рис. 5.1 представлена структурная схема лабораторной установки для исследования процедур кодирования и декодирования при использовании алгоритма Витерби hard. На этой схеме показаны следующие блоки и устройства: генератор псевдослучайной последовательности (1), кодер (2), плоттер, который отображает сигналы в разных точках лабораторной установки (3), канал передачи типа BSC

(двоичный симметричный канал) (4), блок, который реализует алгоритм Витерби hard (5), схема задержки (6). Отдельные элементы типа bias (смещение) и источники сигнала не обозначены и не пронумерованы на этой схеме.

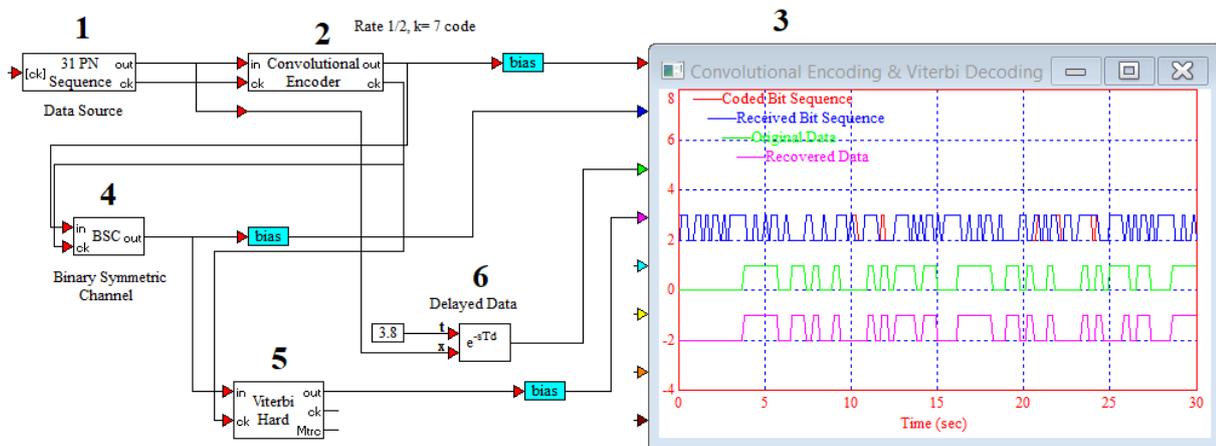


Рис. 5.1. Структурная схема лабораторной установки для исследования процедур кодирования и декодирования при использовании алгоритма Витерби

В настоящее время сверточные коды, построенные с использованием алгоритма Витерби и алгоритма последовательного декодирования, получили широкое распространение в радиорелейных, спутниковых и других системах связи [16].

Параллельно с перечисленными работами велись исследования по методам исправления пакетов ошибок, характерных для многих каналов связи [16]. Оказалось, что задача исправления таких ошибок может быть сведена к применению метода перемежения символов. Его суть состоит в том, что выполняется перестановка передаваемых символов таким образом, чтобы соседние символы передаваемой кодовой комбинации, пораженные ошибками, в результате оказались бы разнесенными во времени. На приеме сигнала приемная сторона произ-

водит восстановление исходного порядка символов. Этот простой подход применяется во многих системах радиорелейной и подвижной связи, в которых при приеме цифровых сигналов имеет место группирование ошибок [20].

Использование процедуры кодирования дает наилучшие результаты при разумном согласовании модема и кодека. Это возможно, если в демодуляторе принимается так называемое мягкое (предварительное) решение о принимаемом символе и если декодер получает дополнительную информацию, которая повышает надежность принятого в демодуляторе окончательного решения.

В простейшем случае передачи бинарных сигналов символы, для которых надежные решения не могут быть приняты в демодуляторе, стираются и декодер извещается о тех позициях кода, на которых находятся стертые символы. Идеи применения мягкого решения в демодуляторе (декодирование кодовых комбинаций не в исходные, а в промежуточные) зародились с начала возникновения теории кодирования. На приемной стороне наряду с жестким (hard) (окончательным) решением о значениях всех символов дополнительно определяется наименее надежный из них. При декодировании этот символ изменяется на противоположный, если проверка принятой кодовой комбинации на четность не выполняется. При наличии всего одного проверочного символа в кодовой комбинации такой алгоритм декодирования позволяет корректировать одиночные ошибки [20].

Декодирование сверточных кодов при мягком решении в демодуляторе можно осуществлять с использованием алгоритмов Витерби и последовательного декодирования.

В 1993 г. были предложены новые турбокоды, которые обеспечивают уровень помехоустойчивости, приближающийся к теоретически достижимым значениям (так называемому пределу Шеннона). Они относятся к классу параллельных каскадных кодов, в которых проверочная группа формируется двумя кодерами составных рекурсивных сверточных кодов [16].

Различие между комбинациями кода характеризуется кодовым расстоянием (расстоянием Хэмминга)  $d$ , которое определяется числом единиц в сумме

этих комбинаций по  $\text{mod} = 2$ . Для безызбыточного (с использованием всех комбинаций в качестве разрешенных) первичного натурального кода кодовое расстояние равно единице, т. е. в таком коде отсутствует возможность обнаружения ошибок [16].

Процедура исправления ошибок в процессе декодирования сводится к определению расстояния  $d_0$  между переданной разрешенной комбинацией и принятой запрещенной комбинацией, равного кратности ошибок. Естественно, корректирующая способность кода возрастает с увеличением  $d_0$ . Известные характеристики (вероятность  $P_{\text{ош}}$ , избыточность  $\chi$  и общее число символов  $n$  кодовой комбинации) определяют корректирующую способность кода [20]. Общая задача, которая ставится при создании корректирующего кода, заключается в достижении наименьших значений  $P_{\text{ош}}$  и  $\chi$ . Целесообразность применения того или иного кода обусловлена сложностью кодирующих и декодирующих устройств, которая зависит от  $n$ .

## 5.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера.

2. В меню File выбрать опцию Open. На диске C (или другом – по указанию преподавателя) открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, Encode\_Decode. Загрузить файл ReedSolomon. Представленный пример позволяет изучить особенности функционирования декодера Рида – Соломона.

Верхний многофункциональный плоттер, или графопостроитель (Plot), в приведенном примере называется Rs Errors per Frame. Данное устройство позволяет показать зависимость количества корректируемых ошибок от номера кадра (или фрейма), отражаемую кривой синего цвета. Красным цветом показано изменение номера кадра. Средний плоттер показывает изменение принятого деко-

дированного сигнала относительно входного потока, задержанного на определенное время (Decoded Symbols vs Original Data). Нижний плоттер (Uncorrected Error Events) показывает изменение разницы между принятым декодированным сигналом и входным потоком, задержанным на определенное время, т. е. отображается фактическое наличие некомпенсированных ошибок в потоке данных.

Подвести курсор к полю Rs Errors per Frame и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки данного плоттера (Plot Properties). На панели Options включены параметры со следующими выбранными значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы), X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии).

Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – 10, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – –2, X Upper Bound (верхняя граница по X) – 20, X Lower Bound (нижняя граница по X) – 0, Time Scaling (масштаб времени) – None (нет), Sub Plot Count (указатель количества дополнительных рабочих областей) – 1. Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому они здесь подробно не рассмотрены. Для стирания полученного изображения необходимо снова войти в Plot Properties, на панели Options нажать Clear Overplot.

Проверить настройки кодера Рида – Соломона – Encoding Stage RS (204, 188). Подвести курсор к полю Encoding Stage RS (204, 188) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Появится внутренняя схема кодера Рида – Соломона. Необходимо проанализировать и зарисовать эту схему. Она содержит ячейки памяти типа FIFO (First In First Out) объемом 188 информационных символов. Далее данные передаются на кодер RS Encode (204, 188). Выходной блок из 204 бит поступает с выхода кодера на вход преобразователя Unbuffer (204), который преобразует поток данных из параллельного в последовательный вид [20].

Схема содержит бинарный симметричный канал передачи (BSC), который обеспечивает ошибку передачи, равную 3 % [20]. Подвести курсор к полю «3 % Error Channel» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проанализировать и зарисовать схему. Подвести курсор к полю BSC и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Проверить величину коэффициента ошибки канала.

Подвести курсор к полю Decoding Stage и после появления значка  нажать правую клавишу мыши. Появится внутренняя схема декодера Рида – Соломона. Проанализировать и зарисовать эту схему.

Проверить настройки источника равномерно распределенных случайных символов (Random Sym (256)). Подвести курсор к полю «Random Sym (256)» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Появится таблица настройки параметров этого источника, их необходимо перенести в отчет. Для получения дополнительной информации об исследуемых блоках нажмите кнопку помощи (Help).

Запуск программы осуществляется нажатием кнопки ПУСК, расположенной в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажатием на клавиатуре клавиши F5. Для удобства наблюдения кривых можно в настройках плоттеров Decoded Symbols vs Original Data и Uncorrected Error Events по оси X выбрать интервал наблюдения между 3 и 5 с. Аналогично можно подобрать удобную величину настройки и по шкале Y, а также перейти по шкале времени (Time Scaling) к реальному масштабу времени, например, выбрав MilliSeconds (миллисекунды).

Проанализировать полученные изображения сигналов на трех плоттерах. Зарисовать или распечатать полученные изображения. Исследовать форму сигнала и при других начальных параметрах, задаваемых для канала «3 % Error Channel». Подвести курсор к полю «3 % Error Channel» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Подвести курсор к полю BSC и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Установить величину коэффициента ошибки канала, равную 1 %. Запустить программу кнопкой ПУСК или нажать на

клавиатуре кнопку F5. Зарисовать или распечатать полученные изображения. Аналогичные измерения проделать и для вероятности ошибки, равной 10 %. Зарисовать или распечатать полученные изображения. Сделать выводы. В меню File выбрать опцию Close, т. е. закрыть рассмотренный пример.

3. В меню File выбрать опцию Open. В папке Encode\_Decode открыть файл Viterbi\_Hard. Данный пример позволяет изучить особенности функционирования декодеров Витерби, работающих по жесткому алгоритму декодирования. Источником кодированного сигнала является сверточный кодер (Convolutional Encoder), на вход которого подается сигнал с выхода источника псевдослучайного сигнала (31 PN Sequence). Подвести курсор к полю Convolutional Encoder и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать параметры установки этого кодера: число входных бит (No Inf. Bits) k, число выходных бит (No Coded Out. Bits) n, длину L битной последовательности (Constraint Length), определяемую размером k внутреннего буфера. Значение k можно выбирать в диапазоне от 1 до 7, а максимальная величина L определяется из формулы  $k \cdot L = 15$ .

Подвести курсор к полю генератора псевдослучайного сигнала «31 PN Sequence» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать параметры установки этого кодера, которые появляются на экране.

Запустить программу кнопкой ПУСК или нажатием на клавиатуре клавиши F5. Зарисовать (распечатать) и проанализировать полученные изображения. Исследовать форму сигнала и при других начальных параметрах, задаваемых для канала BSC. Подвести курсор к полю BSC и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Установить величину коэффициента ошибки канала, равную 1 %. Зарисовать или распечатать полученные изображения. Аналогичные измерения провести и для вероятности ошибки, равной 10 %. Зарисовать или распечатать полученные изображения. В меню File войти в опцию Close, т. е. закрыть рассмотренный пример.

4. В меню File выбрать опцию Open. Открыть папку Encode\_Decode и загрузить файл Viterbi\_Soft. Данный пример позволяет изучить особенности функционирования декодеров Витерби, работающих по мягкому алгоритму декодирования. Изучить и зарисовать представленную схему.

Источником кодированного сигнала является сверточный кодер (Convolutional Encoder), на вход которого подается сигнал с выхода источника псевдослучайного сигнала (31 PN Sequence). Подвести курсор к полю Convolutional Encoder и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать параметры установки этого кодера: число входных бит (No Inf. Bits)  $k$ , число выходных бит (No Coded Out. Bits)  $n$ , длину  $L$  битной последовательности (Constraint Length), определяемую размером  $k$  внутреннего буфера, и другие параметры.

Подвести курсор к полю генератора псевдослучайного сигнала «31 PN Sequence» и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Записать параметры установки этого кодера.

Записать параметры установки для модулятора (Old BPSK Mod) и канала с гауссовской характеристикой (AWGN). Изучить блоки мягкого и жесткого решений (Soft Decisions и Hard Decisions). Зарисовать структуру этих блоков.

После кодирования сигнал через модулятор Old BPSK Mod и канал AWGN поступает на вход субблока мягкого решения. Он предназначен для уменьшения влияния шумов канала и состоит из накопителя и преобразователя. Сигнал преобразователя подается на субблок мягкого решения с задержкой, равной задержке информационного сигнала в канале. Для этого используется специальный блок задержки (Delay). Далее сигнал из блока мягкого решения поступает на блок жесткого решения (Hard Decisions). Он состоит из преобразователя, демодулятора и декодера Витерби с мягким алгоритмом декодирования (Viterbi\_Soft) [20].

Запустить программу кнопкой ПУСК или нажатием на клавиатуре кнопки F5. Зарисовать (распечатать) и проанализировать полученные изображения. Исследовать форму сигнала и при других начальных параметрах, задаваемых для канала AWGN (изменить отношение сигнал/шум) и модулятора Old BPSK Mod (изменить вид модуляции). Запустить программу кнопкой ПУСК или нажатием на клавиатуре кнопки F5. Зарисовать (распечатать) и проанализировать полученные изображения. Сделать выводы. В меню File выбрать опцию Close, т. е. закрыть рассмотренный пример.

5. Открыть и просмотреть примеры, описывающие другие виды кодеров и декодеров: блок перемежителя или деперемежителя (Interleaver/Deinterleaver), кодер с предварительным преобразованием последовательности следования символов (Gray Map или инверсный вариант – Reverse Gray Map), решетчатый кодер/декодер (Trellis Encoder/Decoder). Для получения дополнительной информации об исследуемых блоках нажать кнопку помощи Help, подведя курсор к соответствующему блоку или узлу.

6. В меню File выбрать команду Close. Сделать выводы. Выйти из программы, выключить компьютер.

### **5.3. Содержание отчета**

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы исследованных кодеров и декодеров.
2. Полученные графические зависимости.
3. Выводы по проделанной работе.

### **5.4. Контрольные вопросы**

1. Как классифицируются коды, которые используются в системах телекоммуникаций? Что послужило причиной их разработки?

2. Поясните особенности построения блочных кодов, корректирующих ошибки. В чем заключается их основной принцип построения?

3. Поясните особенности построения сверточных, или рекуррентных кодов. В чем заключается их принцип построения?

4. Поясните суть и особенности использования метода перемежения символов.

5. Что представляет из себя параметр «Кодовое расстояние»?

6. Поясните назначение и особенности функционирования исследованного декодера Рида – Соломона.

7. Поясните работу источника равномерно распределенных случайных символов Random Sym.

8. Зарисуйте схему и поясните особенности функционирования декодеров Витерби, работающих по жесткому алгоритму декодирования.

9. Зарисуйте схему и поясните особенности функционирования декодеров Витерби, работающих по мягкому алгоритму декодирования.

## Практическая работа № 6

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

**Цель работы:** изучить особенности формирования и функционирования беспроводных линий связи.

### 6.1. Характеристики и параметры антенн

В наше время преобладающая доля информации передается с использованием беспроводных средств связи, в которых выход источника сигнала и вход приемника соединены между собой посредством радиолинии. Радиолиния содержит антенно-фидерные устройства (АФУ) в передающем и приемном устройствах и радиотрассу, т. е. некоторую область пространства, в которой распространяются свободные электромагнитные волны. Каждое АФУ включает в себя антенну и ряд элементов между выходом передатчика и входом антенны или выходом антенны и входом передатчика.

Параметры антенны можно разделить на две группы: первая группа – параметры, характеризующие антенну как двухполюсник, потребляющий мощность от питающего ее фидера, вторая группа – параметры, характеризующие антенну как устройство, излучающее радиоволны, которые распространяются в окружающем пространстве. В первой группе основным параметром является входной импеданс антенны, который определяет комплексную мощность, поступающую на вход антенны. Комплексный характер импеданса антенны можно пояснить, если представить излучатель как область перехода между фидером и свободным пространством. Для описания антенн как отрезков линий передачи применяют такие параметры, как комплексный коэффициент отражения от входа антенны, который равен отношению комплексной амплитуды отраженной волны к комплексной амплитуде падающей волны, коэффициент стоячей волны по

напряжению (КСВН) в линии, питающей антенну, или обратная ему величина – коэффициент бегущей волны (КБВ). Важным параметром, определяющим эффективность антенны, является коэффициент полезного действия (КПД), который равен отношению излученной мощности к мощности, подаваемой на вход антенны.

Вторая группа параметров характеризует антенну как источник электромагнитных волн и определяет зависимость от направления амплитуды, фазы и поляризации излученных радиоволн. К этим параметрам относится амплитудная диаграмма направленности – зависимость от направления амплитуды волны в дальней зоне при фиксированном расстоянии. Согласно определению амплитудная диаграмма направленности (ДН) представляет собой пространственную фигуру, поверхность которой описывается концом исходящего из начала координат радиуса-вектора, длина которого в каждом направлении равна значению функции  $f(\theta, \varphi)$ .

На рис. 6.1 представлена диаграмма направленности антенны с одним выделенным направлением излучения [19]. Диаграмма может быть представлена в трехмерном пространстве (рис. 6.1) или в полярных координатах (рис. 6.2) [12; 19].

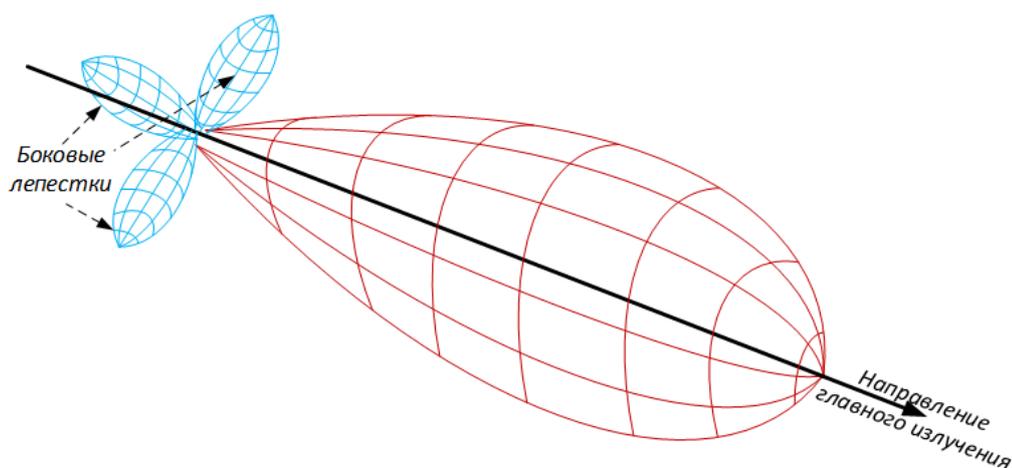


Рис. 6.1. Диаграмма направленности антенны

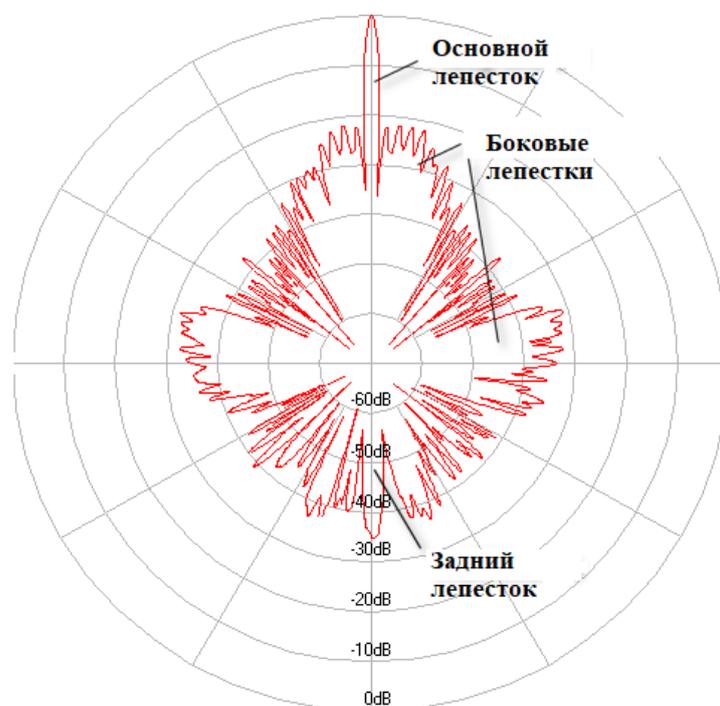


Рис. 6.2. Диаграмма направленности антенны в полярных координатах

ДН можно проанализировать в двух перпендикулярных плоскостях электрического вектора  $E$  и магнитного вектора  $H$  (рис. 6.3) [12; 19].

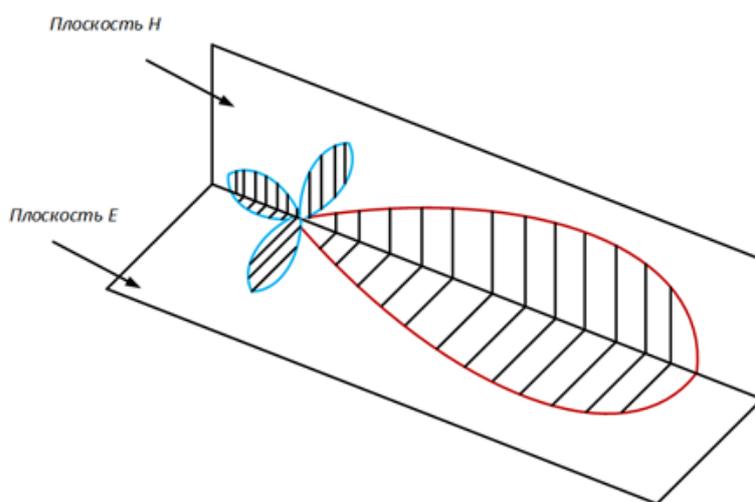


Рис. 6.3. Диаграмма направленности антенны в плоскостях электрического вектора  $E$  и магнитного вектора  $H$

Другими важными характеристиками антенны являются: ширина главного лепестка по нулевому излучению  $\theta_0$  и ширина главного лепестка по уровню половинной мощности  $\theta_{0,5}$ , интенсивности бокового и обратного излучения (мощности боковых и задних лепестков), отсюда вытекают еще два важных параметра антенны – это коэффициент защитного действия и уровень боковых лепестков.

Коэффициент усиления является определяющим параметром передающих антенн, так как показывает, во сколько раз необходимо уменьшить мощность, подводимую к направленной антенне, по сравнению с эталонной, чтобы напряженность поля в главном направлении осталась неизменной.

Учет поляризации позволяет получить дополнительный энергетический выигрыш при анализе проблем электромагнитной совместимости, моделировании зон обслуживания и т. д. При планировании размещения Wi-Fi точками доступа до предельного количества, когда взаимные радиопомехи начинают оказывать мешающее воздействие для нормальной работы сетей, можно изменить плоскость поляризации антенн, после чего можно продолжать увеличивать количество этих точек.

Коэффициент усиления антенны по отношению к дипольной антенне выражается в децибелах, а по отношению к изотропной – в изотропных децибелах. В системах связи коэффициенты усиления  $K$ , уровни сигнала  $p$  и ряд других параметров можно определить по следующему выражению:

$$K = p = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_x}{P_0} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{V_x}{V_0} \right), \quad (6.1)$$

где  $P_x$  – измеренная мощность в некоторой точке  $x$ ;  $P_0$  – опорное значение мощности;  $V_x$  – измеренное напряжение в вольтах,  $V_0$  – опорное напряжение в вольтах.

Если в качестве опорного значения мощности выбрано значение 1 мВт, тогда размерностью параметра  $K$  будет дБм.

Задача 1. Определить уровень сигнала в некоторой точке  $x$ , если измеренное значение мощности составило 0,01 мВт.

Решение. Величину ослабления сигнала найдем по формуле

$$p = 10 \cdot \lg\left(\frac{0,01}{1}\right) = -20 \text{ дБм.}$$

Из полученного выражения видно, что величина уровня может принимать как положительные (при значениях мощности больше 1 мВт), так и отрицательные значения (при значениях мощности меньше 1 мВт).

Задача 2. Найти суммарное усиление (или затухание)  $G$  и выходную мощность  $P_{\text{ВЫХ}}$  для тракта, который состоит из последовательно включенных блоков или элементов: первый блок представлен кабелем с потерями 8 дБ, второй блок – усилителем с усилением 23 дБ, а третий блок – еще одним кабелем с потерями 10 дБ. На входе тракта подается сигнал с мощностью  $P_{\text{ВХ}} = 2$  мВт.

Решение. Определим мощность на выходе по формуле. Суммарное усиление тракта  $G$  равно

$$-8 + 23 - 10 = 5 \text{ дБ.}$$

Выходная мощность  $P_{\text{ВЫХ}}$  определяется из

$$G = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}\right),$$

тогда  $P_{\text{ВЫХ}} = 2 \cdot 10^{0,5} = 6,32$  мВт.

## 6.2. Энергетические параметры и характеристики радиолиний

Функционирование цифровых систем связи определяет величина отношения сигнал/шум  $E_b/N_0$ , в качестве которого рассматривается отношение энергии сигнала к плотности мощности шумов при передаче одного бита в полосе 1 Гц [17]. Энергию одного бита сигнала можно найти по следующей формуле:

$$E_b = P \cdot T_b, \quad (6.2)$$

где  $P$  – мощность сигнала;  $T_b$  – время передачи одного бита.

Скорость передачи данных  $R$  можно представить в виде следующей формулы:

$$R = 1/T_b. \quad (6.3)$$

Тепловой шум, присутствующий в полосе шириной 1 Гц, для любого устройства или проводника может быть описан параметром [17]

$$N_0 = k \cdot T, \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}, \quad (6.4)$$

где  $N_0$  – плотность мощности шумов в ваттах на 1 Гц полосы;  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,3803 \times 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – температура в кельвинах (абсолютная температура).

Тогда величина отношения сигнал/шум составит

$$E_b/N_0 = \frac{P/R}{N_0} = \frac{P}{k \cdot T \cdot R}. \quad (6.5)$$

Величина коэффициента ошибок уменьшается при увеличении значения параметра  $E_b/N_0$ . При заданном значении  $E_b/N_0$ , требуемом для получения желаемого уровня ошибок, можно определить другие параметры в уравнении (6.5). Ясно, что для сохранения требуемого значения  $E_b/N_0$  при повышении скорости передачи данных  $R$  потребуется увеличивать мощность передаваемого сигнала по отношению к шуму.

Задача 3. Величина отношения  $E_b/N_0$  равна 9 дБВт. Найти выходную мощность  $P$ , если температура  $T$  равна 300 К, а скорость передачи  $R$  равна 1 Мбит/с.

Решение. Из формулы (6.5) выразим величину мощности  $P$  [17]:

$$P = E_b/N_0 \cdot k \cdot T \cdot R.$$

Для упрощения моделирования можно представить это выражение в виде

$$P_{\text{дБВт}} = 10 \cdot \lg(E_b/N_0 \cdot k \cdot T \cdot R) = (E_b/N_0)_{\text{дБ}} + 10 \cdot \lg(k \cdot T \cdot R).$$

В результате имеем  $P_{\text{дБВт}} = -83,55$  дБВт или  $P = 10^{-8,355}$  Вт.

Рассмотрим особенности расчета дальности связи в беспроводных системах связи, работающих в свободном пространстве. Определение потерь сигнала опирается на выражение, которое позволяет определить уровень сигнала  $p_m(r)$  на входе приемника:

$$p_m(r) = p_n + g_1 + g_2 - a_1 - a_2 - a_{\text{MX}}(f, r, h_{\text{BC}}, h_{\text{AC}}), \quad (6.6)$$

где  $p_n$  – уровень мощности передатчика;  $g_1$  и  $g_2$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, дБ;  $a_1$  – потери сигнала в элементах антенно-фидерного тракта передатчика, дБ;  $a_2$  – потери сигнала в элементах антенно-фидерного тракта приемника, дБ;  $a_{\text{MX}}(f, r, h_{\text{BC}}, h_{\text{AC}}) = L$  – общее ослабление радиосигнала при распространении, параметр  $a$  выражен в децибелах, параметр  $r$  в километрах.

Потери сигнала в свободном пространстве можно определить следующим образом [17]:

$$\text{FSL} = 33 + 20(\lg F + \lg D) - \text{SOM}, \quad (6.7)$$

где FSL (free space loss) – потери в свободном пространстве, дБ;  $F$  – центральная частота канала, на котором работает система связи, МГц;  $D$  – расстояние между двумя точками, км; SOM (System Operating Margin) – запас в уровне сигнала на радиолинии, дБ.

Параметр SOM учитывает возможные факторы, которые ограничивают дальность связи: температурную зависимость параметров приемника и передатчика, неточности настройки антенн приемника и передатчика с антенно-фидерным трактом и другие факторы.

Известно, что для каждой скорости сигнала приемное устройство должно иметь определенную чувствительность. При небольших значениях скоростей, которые составляют небольшую величину (приблизительно единицы мегабит в секунду), чувствительность лежит в диапазоне от  $-90$  дБм до  $-94$  дБм. При повышении скорости значение чувствительности должно быть выше. Так при скорости передачи  $54$  Мбит/с чувствительность приемника составляет  $-66$  дБм, а при скорости передачи  $9$  Мбит/с чувствительность приемника составляет  $-86$  дБм.

Из формулы (6.7) можно вывести формулу для параметра  $D$  [17]:

$$D = 10^{\left(\frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} - \lg F\right)}. \quad (6.8)$$

Задача 4. Определить дальность работы радиолинии. Заданы скорости передачи –  $54$  и  $6$  Мбит/с для точки доступа (ТД) и беспроводного адаптера (БА) [17]. Уровень выходной мощности их передатчиков одинаков и равен  $16$  дБм. Чувствительность ТД на скорости  $54$  Мбит/с составляет величину  $-66$  дБм. Чувствительность БА на скорости  $6$  Мбит/с равна  $-88$  дБмВт. Чувствительность ТД на скорости  $54$  Мбит/с составляет  $-66$  дБмВт. Чувствительность БА на скорости  $6$  Мбит/с равна  $-87$  дБмВт. Коэффициент усиления штатной антенны ТД равен  $2$  дБи. Коэффициент усиления штатной антенны БА составляет  $0$  дБи. Величину потерь в антенно-фидерном трактах БА и ТД примем равной нулю.

Решение.

1. Выполним расчеты для скорости  $54$  Мбит/с. Определим величину параметра  $FSL = 16 + 2 - (-66) - 10 = 74$  дБ. Здесь учтена величина параметра  $SOM = 10$  дБ. По формуле (6.8) находим дальность связи для Wi-Fi, которая работает на частоте  $6$  канала, равной  $2437$  МГц:

$$D = 10^{\left(\frac{74}{20} - \frac{33}{20} - \lg 2437\right)} = 0,046 \text{ км} \approx 50 \text{ м.}$$

2. Выполним расчеты для скорости 6 Мбит/с.

$$FSL = 16 + 2 - (-88) - 10 = 96 \text{ дБ.}$$

3. По формуле (6.8) найдем расстояние равно

$$D = 10^{\left(\frac{96}{20} - \frac{33}{20} - \lg 2437\right)} = 0,579 \text{ км} \approx 580 \text{ м.}$$

Анализ полученных результатов показывает, что при уменьшении скорости удастся значительно повысить дальность связи.

## Практическая работа № 7

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ СИГНАЛА В СИСТЕМАХ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА UMTS

**Цель работы:** изучить особенности моделирования потерь сигнала в системах сотовой связи стандарта UMTS.

### 7.1. Определение компонентов потерь сигналов в сетях радиодоступа

Основная задача при моделировании потерь сигнала в системах сотовой связи – рассчитать максимально допустимые потери на трассе [18]. Зная значения допустимых потерь и применяя модель COST-Hata, можно определить зону покрытия соты для оборудования стандарта UMTS. При моделировании потерь сигнала на радиолинии учитываются характеристики антенн, параметры соединительных кабелей, параметры процедуры разнесения и другие факторы [1; 14]. Результатом моделирования будут максимально разрешенные потери на трассе.

При моделировании важным параметром является  $E_b/N_0$  – отношение средней энергии бита сигнала к спектральной плотности шума. Величина параметра  $E_b/N_0$  определяется типом сервиса, скоростью перемещения абонента, параметрами радиоканала  $R$  (скоростью передачи) и  $W$  (полосой частотного канала) [18].

Минимально допустимое значение  $E_b/N_0$  на входе приемника – это характеристика оборудования (приемника). Это значение будет индивидуальным для систем разных компаний, также оно будет разным для приемников базовой и мобильной станций вследствие различий в их конструкциях [18]. Значения требуемого отношения  $E_b/N_0$  определены спецификациями 3GPP (3GPP 25.101) для различных типов услуг (типов радиоканала). Для примера в табл. 7.1 представлены данные с учетом параметров оборудования базовых станций NSN Flexi WCDMA [3; 15; 18]. Из таблицы следует, что значение параметра  $E_b/N_0$  зависит от вида

услуги (скорость передачи, требование к отношению сигнал/шум, метод канального кодирования), характеристик радиоканала (скорость движения абонента, частота), типа процедур (мягкая процедура эстафетной передачи, разнесенный прием, использование управления мощностью) [18].

Таблица 7.1

Значения  $E_b/N_0$  для различных типов услуг

Вид услуги, скорость передачи	Значения $E_b/N_0$ , дБ	
	при скорости 3 км/ч	при скорости 120 км/ч
Линия от МС к БС		
Телефония (12,2 кбит/с)	4,4	5,4
Передача данных (64 кбит/с)	2	2,9
Передача данных (144 кбит/с)	1,4	2,4
Передача данных (384 кбит/с)	1,7	2,9
Линия от БС к МС		
Телефония (12,2 кбит/с)	7,9	7,4
Передача данных (64 кбит/с)	5	4,5
Передача данных (144 кбит/с)	4,7	4,2
Передача данных (384 кбит/с)	4,8	4,3

Для расчета мощности теплового шума в приемнике необходимо знать величину полосы пропускания фильтра [18]. Для стандарта UMTS полосу согласованного фильтра можно принять равной 3,84 МГц [7; 8]. Уровень собственных шумов приемника можно записать

$$P_{ш} = N + K_{ш} = k \cdot T \cdot B + K_{ш} = -108 + K_{ш}, \text{ дБм}, \quad (7.1)$$

где  $N$  – уровень мощности теплового шума в приемнике;  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $T = 300 \text{ К}$ .

Минимально допустимый уровень сигнала на входе приемника можно определить как [7; 8; 18]

$$P_{пр} = P_{ш} + (E_b/N_0)_{\text{треб}} - G_{\text{обр}}, \quad (7.2)$$

где  $(E_b/N_0)_{\text{треб}}$  – требуемое значение  $E_b/N_0$ ; параметр  $G_{\text{обр}}$  – выигрыш от обработки.

Минимально допустимый уровень сигнала на входе приемника зависит от требуемого отношения  $E_b/N_0$ , скорости передачи данных пользователя, качества компонентов приемника, уровня помех. Помехи могут создавать разные источники: абоненты из обслуживающей соты, абоненты, обслуживаемые другими сотами, другие источники, действующие в диапазоне используемого частотного канала [18].

Необходимо учитывать и запас на допустимые внутрисистемные помехи [18]. При расчете используется величина запаса на внутрисистемные помехи, которая характеризует возрастание мощности шума на входе приемника. Важным параметром, присутствующим при расчете энергетических параметров сетей UMTS, является выигрыш за счет мягкого хэндовера. Мягкий хэндовер имеет место в том случае, когда мобильная станция соединена как минимум с двумя сотами одновременно. В случае если эти соты принадлежат двум разным

базовым станциям (Node B), объединение двух восходящих каналов осуществляется контроллером радиосети. В случае если соты принадлежат одной базовой станции, объединение сигналов осуществляется базовой станцией. Выигрыш от мягкого хэндовера зависит от условий распространения радиоволн. В городах, где замирания сигналов очень существенны, корреляция между сигналами, пришедшими от разных источников, мала, в результате возрастает выигрыш от использования мягкого хэндовера. Наоборот в сельской местности, когда сигналы незначительно подвержены замираниям, корреляция между сигналами от разных источников возрастает, и выигрыш уменьшается. Величина выигрыша может меняться в пределах 2–5 дБ [18].

Алгоритм быстрого управления мощностью введен в UMTS для того, чтобы поддерживать требуемое значение  $E_b/N_0$  на входе приемника постоянным во время быстрых замираний, обусловленных многолучевостью, глубина замираний может достигать до 30 дБ [18]. Быстрое управление мощностью особенно важно для абонентов, имеющих малую скорость передвижения, так как они не могут быстро изменить свое положение для компенсации глубоких замираний. На границе соты мощность передатчика мобильной станции максимальна, таким образом, не остается запаса на управление мощностью для компенсации быстрых замираний. Для того чтобы учесть этот процесс, в расчете обычно задают величину запаса на быстрые замирания, которая выбирается в диапазоне от 0 до 5 дБ.

## 7.2. Моделирование характеристик радиолинии от МС к БС

Минимально допустимый уровень сигнала на входе приемника БС определяется из формулы (7.2) [18]:

$$P_{\text{пр.БС}} = P_{\text{ш}} + (E_b/N_0)_{\text{треб}} - G_{\text{обр}}, \quad (7.3)$$

где  $(E_b/N_0)_{\text{треб}}$  – требуемое значение  $E_b/N_0$ ;  $G_{\text{обр}}$  – выигрыш от обработки;  $P_{\text{ш}}$  – уровень собственных шумов приемника.

Уровень шумов приемника БС можно определить по формуле (7.1) с учетом известного коэффициента шума приемника [18].

Выигрыш от обработки для скорости передачи  $R$ , принимая величину скорости следования чипов  $W$  равной 3,84 Мчип/с, составляет [18]

$$G_{\text{обр}} = \frac{W}{R}, \text{ раз или } G_{\text{обр}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{W}{R}\right), \text{ дБ}, \quad (7.4)$$

где  $W$  – чиповая скорость стандарта UMTS;  $R$  – скорость передачи данных пользователя.

Также, как описывалось ранее, необходимо учесть выигрыш за счет мягкого хэндовера и запас на внутрисистемные помехи. Величину выигрыша за счет мягкого хэндовера  $G_{\text{хо}}$  выбирают из диапазона значений 1–3 дБ [18].

Требуемый уровень принимаемого сигнала определяется выражением [18]

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр.БС}} + L_{\text{фидер}} - G_{\text{БС}} + L_{\text{ff}}, \text{ дБм}, \quad (7.5)$$

где  $L_{\text{фидер}}$  – потери в фидере, дБ (как правило, длину и тип фидера выбирают таким образом, чтобы значение затухания в нем составляло не более 3 дБ);  $G_{\text{БС}}$  – коэффициент усиления антенны базовой станции, дБ;  $L_{\text{ff}}$  – запас на быстрые замирания, дБ (обычно значение  $L_{\text{ff}}$  принимается равным 3 дБ).

Эффективно излучаемый уровень сигнала мобильной станции определяется выражением [18]

$$P_{\text{из.МС}} = P_{\text{МС}} + G_{\text{МС}} - L_{\text{тело}}, \text{ дБм}, \quad (7.6)$$

где  $P_{МС}$  – уровень сигнала передатчика мобильной станции;  $G_{МС}$  – коэффициент усиления антенны мобильной станции, величина которого обычно принимается равной 0 дБ;  $L_{\text{тело}}$  – потери на затухание в теле абонента.

Для расчетов при передаче телефонных сигналов величину параметра  $L_{\text{тело}}$  принимают обычно равной 3 дБ. Необходимо заметить, что, как правило, потери на затухание в теле учитываются для голосовых типов услуг и могут не учитываться для услуг по передаче данных.

Допустимые потери на трассе равны

$$L = P_{\text{из.МС}} - P_{\text{пр.}} \quad (7.7)$$

### 7.3. Моделирование характеристик радиолинии от БС к МС

Минимально допустимый уровень сигнала на входе приемника мобильной станции определяется аналогично формуле (7.2) [18]:

$$P_{\text{пр.МС}} = P_{\text{ш}} + (E_b/N_0)_{\text{треб}} - G_{\text{обр.}} \quad (7.8)$$

Минимально допустимый уровень сигнала на входе приемника МС с учетом запаса на внутрисистемные помехи и выигрыш от мягкого хэндовера равен

$$P_{\text{пр.МС}} = P_{\text{ш}} + (E_b/N_0)_{\text{треб}} - G_{\text{обр.}} - L_{\text{п}} - G_{\text{хо}}, \text{ дБм}, \quad (7.9)$$

где  $(E_b/N_0)_{\text{треб}}$  – минимально допустимое значение  $E_b/N_0$  на входе приемника;  $G_{\text{обр.}}$  – выигрыш от обработки;  $L_{\text{п}}$  – запас на внутрисистемные помехи. Обычно значение параметра  $L_{\text{п}} = 3$  дБ, а величина  $G_{\text{хо}}$  (выигрыш за счет мягкого хэндовера) составляет 2–3 дБ.

Требуемый уровень принимаемого сигнала определяется выражением

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр.МС}} + L_{\text{тело}} - G_{МС} + L_{\text{ff}}, \text{ дБм}. \quad (7.10)$$

Уровень эффективно излучаемого сигнала БС

$$P_{\text{из.БС}} = P_{\text{БС}} + G_{\text{БС}} - L_{\text{фидер}}, \text{ дБм} \quad (7.11)$$

где  $P_{\text{БС}}$  – уровень сигнала передатчика базовой станции на кодовый канал;  
 $G_{\text{БС}}$  – коэффициент усиления антенны базовой станции;  $L_{\text{фидер}}$  – потери, обусловленные затуханием в фидере.

Допустимые потери на трассе

$$L = P_{\text{из.БС}} - P_{\text{пр}}. \quad (7.12)$$

#### **7.4. Использование моделей расчета потерь радиосигнала.**

##### **Определение радиуса соты**

Расчет составляющих потерь в сотовых системах связи включает в себя расчет потерь при распространении радиоволн, определение потерь в элементах базовой и абонентской станций и др. Существует несколько методик для оценки величины потерь при распространении радиоволн между БС и МС.

Исходя из вышеуказанных ресурсов радиолинии, расстояние до границ соты, или параметр «Радиус соты»  $R$  можно вычислить по известной модели распространения, например, с использованием моделей Окамура – Хата, COST231 – Хата, Уолфиша – Икегами и др.

Модель COST231 – Хата справедлива для расчетов в диапазоне частот от 1500 до 2000 МГц при высоте антенны БС от 30 до 200 м, антенны МС от 1 до 10 м и на расстояниях между МС и БС от 1 до 30 км. При расчете затухания  $L$  для этой модели используются следующие формулы:

$$L = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(H_{\text{БС}}) - \alpha(H_{\text{МС}}) + [44,9 - 6,55 \cdot \lg(H_{\text{БС}})] \cdot \lg(R) + D, \\ \alpha(H_{\text{МС}}) = (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot H_{\text{МС}} - 1,56 \cdot \lg(f) - 0,8, \quad (7.13)$$

где  $H_{BC}$  – высота подвеса антенны BC;  $H_{MC}$  – высота подвеса антенны MC;  $R$  – расстояние, км;  $D$  – постоянная, значение которой для средних городов и пригородных районов равно 0, для центров крупных городов  $D = 3$  дБ,  $\alpha(H_{MC})$  – коэффициент, который используется при расчетах в сельской местности и пригородных районах.

Коэффициенты  $B$  и  $C$  для определения радиуса соты для модели COST231 – Хата будут равны

$$C = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(H_{BC}) - \alpha(H_{MC}) + D, \quad (7.14)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(H_{BC}). \quad (7.15)$$

Формулу (7.13) можно представить в виде

$$L = C + B \cdot \lg(R). \quad (7.16)$$

Из формулы (7.16) можно получить выражение для расстояния до границ соты или дальности связи:

$$R = 10^{\frac{L-C}{B}}. \quad (7.17)$$

## 7.5. Ход работы

Расчеты выполняются по формулам (7.1–7.12), представленным выше. Следует записать необходимую формулу, затем произвести подстановку числовых данных и представить результат расчета. Выполнить расчет радиуса зоны обслуживания в восходящей или нисходящей радиолинии, используя формулы модели COST231 – Хата (7.13–7.17). Сделать выводы и записать в отчет. Данные для расчета выбираются из табл. 7.2–7.6 в соответствии с четырехзначным номером варианта. Во всех вариантах расчета величину коэффициента усиления антенны MC принять равной 0 дБ, а величину запаса на внутрисистемные помехи  $L_{\Pi}$  – равной 2 дБ. Для расчетов при передаче телефонных сигналов величину

параметра  $L_{\text{тело}}$  принять равной 3 дБ, в остальных случаях этот параметр равен нулю. Потери мощности в элементах антенно-фидерного тракта БС принять равными 3 дБ.

При решении задачи с вариантом расчета 1111 исходные данные будут выглядеть следующим образом: уровень сигнала передатчика базовой станции  $P_{\text{БС}} = 38$  дБм; уровень сигнала передатчика мобильной станции  $P_{\text{МС}} = -10$  дБм; коэффициент усиления антенны БС  $G_{\text{БС}} = 14$  дБ; коэффициент шума приемника  $K_{\text{ш}} = 3$  дБ; значение параметра  $E_b/N_0$  для нисходящей линии – 7,9 дБ; значение параметра  $E_b/N_0$  для восходящей линии – 4,4 дБ; вид информации – телефония со скоростью передачи 12,2 кбит/с; выигрыш за счет мягкого хэндовера  $G_{\text{хо}} = 1$  дБ; частота сигнала в радиодиапазоне от МС к БС – 1920 МГц; частота сигнала в радиодиапазоне от БС к МС – 2110 МГц; эффективная высота подвеса антенны БС  $H_{\text{БС}} = 30$  м; высота подвеса антенны АС  $H_{\text{МС}} = 1,5$  м; параметр  $L_{\text{ff}} = 1,25$  дБ. Значения остальных не указанных выше параметров выбрать самостоятельно.

Таблица 7.2

Параметры оборудования сотовой сети связи

Первая цифра номера варианта	Уровень сигнала передатчика БС, дБм	Уровень сигнала передатчика МС, дБм	Коэффициент усиления антенны БС, дБ	Коэффициент шума приемника, дБ
1	38	-10	14	3
2	40	-15	24	3,6
3	33	-6	25	2
4	45	-12	18	2,7
5	48	-17	15	2,3

Таблица 7.3

Значения параметров  $E_b/N_0$  для нисходящей и восходящей линий  
и скорости передачи  $R_k$

Вторая цифра номера варианта	Значение $E_b/N_0$ для нисходящей линии, дБ	Значение $E_b/N_0$ для восходящей линии, дБ	Вид информации, скорость передачи $R_k$ , кбит/с
1	7,9	4,4	Телефония, 12,2 кбит/с
2	5	2	Видеотелефония, 64 кбит/с
3	4,7	1,4	Передача данных, 144 кбит/с
4	4,8	1,7	Передача данных, 384 кбит/с
5	7,9	4,4	Телефония, 12,2 кбит/с

Таблица 7.4

Значения параметра  $G_{xo}$  и частот сигналов в направлении  
от МС к БС и от БС к МС

Третья цифра номера варианта	Выигрыш за счет мягкого хэндовера $G_{xo}$ , дБ	Частота сигнала в направлении от МС к БС, МГц	Частота сигнала в направлении от БС к МС, МГц
1	2	1920	2110
2	2,5	1980	2170
3	3	1940	2130
4	2,2	1960	2150
5	2,8	1930	2120

Таблица 7.5

Значения параметров эффективных высот подвеса антенн  
БС и АС и параметра  $L_{ff}$

Четвертая цифра номера варианта	Эффективная высота подвеса антенны БС $H_{BC}$ , м	Высота подвеса антенны АС $H_{AC}$ , м	Параметр $L_{ff}$
1	30	1,5	1,25
2	20	2	2,4
3	35	1	3,6
4	15	1,8	2,65
5	24	3	2,15

## Практическая работа № 8

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛОВ В СИСТЕМАХ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТОВ UMTS, LTE И NR

**Цель работы:** изучить особенности моделирования пропускной способности каналов в системах сотовой связи стандартов UMTS, LTE и NR.

### 8.1. Особенности моделирования пропускной способности каналов связи стандарта UMTS

В стандарте UMTS, который использует технологию WCDMA, несущая частота является одинаковой для всех сот, поэтому емкость системы ограничена главным образом создаваемыми помеховыми сигналами и числом используемых кодов [18]. Увеличение емкости системы не должно приводить к росту внутрисистемных помех выше заданного значения. Исходя из этого можно оценить предельную емкость системы, при которой уровень внутрисистемных помех становится большим и таким образом уменьшает площадь покрытия соты до нуля. Зная выражение для относительной загрузки соты, можно получить формулу для предельной емкости соты [18].

Для линии от МС до БС относительная загрузка соты может быть определена с помощью выражения [7; 18]

$$\eta_{ul} = \sum_{k=1}^{K_N} \frac{1}{1 + \frac{W}{\rho_k \cdot R_k \cdot v}} \cdot (1 + i), \quad (8.1)$$

где  $K_N$  – количество пользователей;  $W$  – скорость передачи чипов в WCDMA 3,84 Мчип/с;  $\rho_k$  – требуемое отношение  $E_b/N_0$  (при проведении расчетов подставляется значение в размах) для пользователя с номером  $k$ ;  $R_k$  – скорость передачи данных пользователя с номером  $k$ ;  $v$  – коэффициент занятия услуги;

$i$  характеризует «изоляция» соты, отношение  $I_{\text{oth}}/I_{\text{own}}$ , где  $I_{\text{oth}}$  – принятая мощность сигнала от абонентов окружающих сот;  $I_{\text{own}}$  – принятая мощность сигнала от абонентов обслуживающей соты.

В случае обслуживания абонентов с одинаковой скоростью для одного вида передаваемой информации выражение для расчета относительной загрузки соты может быть представлено в виде [18]

$$\eta_{\text{ul}} = \frac{K_N}{1 + \frac{W}{\rho_k \cdot R_k \cdot \gamma}} \cdot (1 + i). \quad (8.2)$$

Из этого выражения, при  $\eta_{\text{ul}} = 1$  может быть найдена предельная емкость соты или количество одновременных соединений при условии работы пользователей с одинаковой скоростью передачи  $R_k$ :

$$N_{\text{пр}} = (1 + \frac{G_{\text{обр}}}{\frac{E_b}{N_0}} \cdot \frac{1}{v}) / (1 + i), \quad (8.3)$$

где  $G_{\text{обр}}$  – выигрыш от обработки (значение подставляется в размах).

Оценим значения предельной емкости соты для предоставляемых типов услуг [18]: голосовая телефония, видеотелефония, передача данных со скоростью 144 кбит/с, передача данных со скоростью 384 кбит/с. Для хорошо изолированных сот (indoor, пикосоты) значение  $i$  очень мало и составляет около 0,1. Соответственно для макросот значение  $i$  увеличивается в связи с возможным перекрытием зон обслуживания. Также заметно влияние количества секторов в соте на увеличение  $i$ , которое связано с тем, что для многосекторных БС используются антенны с более узкой диаграммой направленности и, следовательно, с большим коэффициентом усиления, соответственно зона обслуживания такой БС возрастает.

Величина  $v$  – коэффициент занятия услуги [18]. Данный коэффициент описывает отношение времени передачи данных пользователя к общему времени

занятия канала в случае применения прерывистой передачи (DTX). Типичное значение величины данного коэффициента для телефонии составляет 50 %, так как принимается, что половину разговора занимают паузы. Для расчетов значения данного коэффициента выбрано 67 % с учетом запаса на передачу каналов сигнализации (DPSSN), который принят равным 17 %. Для услуг, предоставляющих передачу данных, коэффициент занятия услуги принимается равным 100 %, так как канал для передачи данных резервируется и используется абонентом только в период самой передачи [18].

Предельную теоретическую емкость соты для линии от БС к МС можно также определить из выражения для относительной загрузки соты в восходящем канале [18]:

$$\eta_{dl} = \sum_{k=1}^{K_N} \frac{1}{1 + \frac{w}{\rho_k \cdot R_k \cdot v}} ((1 - \alpha) + i). \quad (8.4)$$

В случае обслуживания абонентов с одинаковой скоростью для одного вида передаваемой информации формула (8.4) для расчета относительной загрузки соты может быть представлена в виде [18]

$$\eta_{dl} = \frac{K_N}{1 + \frac{w}{\rho_k \cdot R_k \cdot v}} ((1 - \alpha) + i). \quad (8.5)$$

В отличие от выражения для расчета относительной загрузки соты в линии от МС к БС, в данном выражении используется параметр  $\alpha$  – коэффициент ортогональности в нисходящем канале [18]. В радиointерфейсе WCDMA используются ортогональные коды Уолша переменной длины в нисходящей линии для разделения каналов пользователей. В случае отсутствия многолучевости ортогональность этих каналов сохраняется. Однако в многолучевом радиоканале ортогональность кодов нарушается. Следовательно, возрастает уровень внутрисистемных помех. Потеря ортогональности

нисходящих каналов характеризуется значением величины  $\alpha$ . Данная величина оказывает значительное влияние на площадь покрытия и емкость соты в нисходящем канале. Идеальная ортогональность означает, что взаимная корреляция всех каналов равна нулю, следовательно, нежелательные каналы могут быть полностью отделены от полезной информации в приемнике МС. Коэффициент ортогональности, равный единице, соответствует идеальной ортогональности нисходящих каналов. Значение нуль соответствует полной потере ортогональности нисходящих каналов. Обычно коэффициент ортогональности принимает значения от 0,4 до 0,9 в многолучевых радиоканалах.

Предельная емкость соты, т. е. количество одновременных соединений (пользователей), может быть получена из формулы [18]

$$N_{\text{пр}} = \left(1 + \frac{G_{\text{обр}}}{E_b/N_0} \cdot \frac{1}{v}\right) / ((1 - \alpha) + i). \quad (8.6)$$

## 8.2. Ход работы

В процессе моделирования, которое выполняется по формулам, представленным выше, необходимо рассчитать относительные загрузки и предельные емкости соты для нисходящей и восходящей линий. Данные для расчетов выбираются из табл. 8.1–8.3 в соответствии с номером варианта [18]. Например, при решении первой задачи с вариантом расчета 111 исходные данные будут выглядеть следующим образом [18]: значение параметра  $E_b/N_0 = 7,9$  дБ для нисходящей линии, значение параметра  $E_b/N_0 = 4,4$  дБ для восходящей линии, количество пользователей  $K_N = 15$ , коэффициент занятия услуги  $v = 0,67$ , коэффициент ортогональности в нисходящем канале  $\alpha = 0,825$ , параметр, который характеризует «изоляция» соты,  $i = 0,25$ , вид информации – сигнал телефонии со скоростью передачи  $R_k = 12,2$  кбит/с.

Таблица 8.1

Значения параметров  $E_b/N_0$  для нисходящей и восходящей линий

Первая цифра номера варианта	Значение $E_b/N_0$ для нисходящей линии, дБ	Значение $E_b/N_0$ для восходящей линии, дБ
1	7,9	4,4
2	5	2
3	4,7	1,4
4	4,8	1,7
5	7,9	4,4

Таблица 8.2

Значения параметров  $\nu$ ,  $\alpha$  и  $i$  сотовой сети связи

Вторая цифра номера варианта	Коэффициент занятия услуги $\nu$	Коэффициент ортогональности $\alpha$ в нисходящем канале	Параметр, который характеризует «изоляцию» соты, $i$
1	0,67	0,825	0,65
2	1	0,65	0,45
3	1	0,525	0,55
4	1	0,65	0,5
5	0,67	0,45	0,45

Таблица 8.3

Значения параметров  $K_N$  и  $R_k$  сотовой сети связи

Третья цифра номера варианта	Количество пользователей $K_N$	Вид информации, скорость передачи $R_k$ , кбит/с
1	15	Телефония, 12,2 кбит/с
2	10	Видеотелефония, 64 кбит/с
3	20	Передача данных, 144 кбит/с
4	25	Передача данных, 384 кбит/с
5	67	Телефония, 12,2 кбит/с

В процессе проведения расчетов следует определить, будет ли превышена предельная емкость соты в восходящей или нисходящей радиопереносных линиях при том количестве пользователей, которое указано в табл. 8.3. Используя условия заданного варианта, определить количество пользователей  $K_N$ , при обслуживании которых относительная загрузка соты будет равна 0,5 (50 %), что рекомендуется поддерживать на практике для сетей сотовой связи. Сделать выводы.

### **8.3. Моделирование пиковой скорости передачи данных в системах сотовой связи стандартов LTE и NR**

При образовании OFDM-сигнала, который необходим при передаче данных в системах сотовой связи стандартов LTE и NR, первоначально формируется поток последовательных информационных символов с длительностью  $T_u/N$ , где  $T_u$  – длительность одного символа.

Далее этот поток делится на блоки, содержащие  $N$  символов [21]. Затем блок последовательных информационных символов преобразуется в блок параллельных символов. В этом блоке каждый информационный символ соответствует определенной несущей частоте многочастотного сигнала. Ясно, что в этом случае длина символа увеличивается в  $N$  раз. Особенности отображения OFDM-сигнала на плоскости частота-время представлены на рис. 8.1 [21].

Таким образом, общая ширина спектра многочастотного сигнала соответствует ширине спектра исходного сигнала с последовательными символами. Цель такого преобразования – защитить сигнал от узкополосных помех или частичного искажения спектра из-за переотражений и многолучевого распространения.

Защита достигается благодаря тому, что параллельные символы многочастотного сигнала являются кодовым словом для помехоустойчивого кода (например, кода Рида – Соломона), что позволяет восстановить символы в случае их неправильного приема из-за искажений спектра.

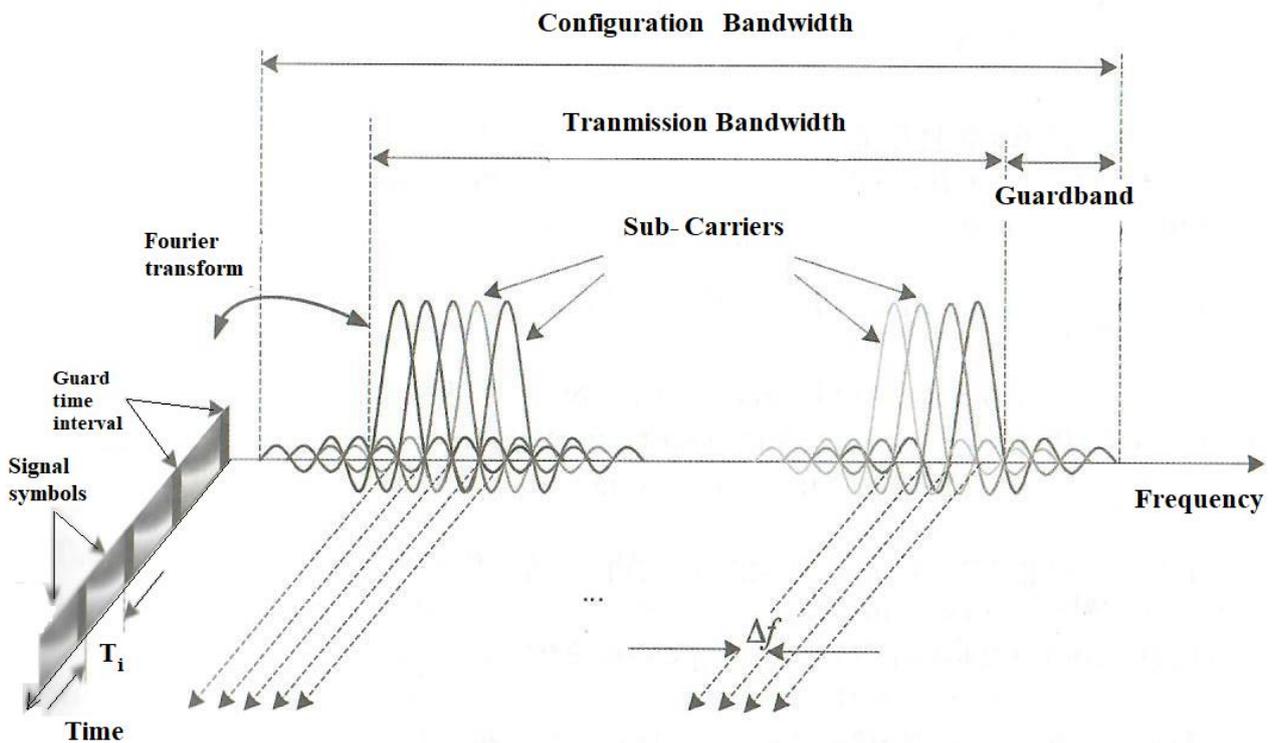


Рис. 8.1. Частотно-временное представление OFDM-сигнала

Преобразование сигнала из временной области в частотную осуществляется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Значения параметра  $\Delta f$ , который определяет разнос частот между поднесущими, для сетей сотовой связи стандартов LTE и NR (поколения 4G и 5G) зависят от величины параметра  $\mu$ , который получил название «нумерология» (табл. 8.4) [21].

Ключевым параметром систем является параметр  $N_{\text{PRB}}^{(i,\mu)}$  – количество PRB (блоков физических ресурсов). Его значение зависит от ширины полосы частот  $W_i$  с нумерологией  $\mu$  (или  $\Delta f$ ). Для системы связи LTE (поколение 4G) общая ширина блока физических радиочастот составляет всего  $12 \cdot 15$  кГц (или  $24 \cdot 7,5$  кГц) = 180 кГц [21].

Для систем сотовой связи 5G предусмотрено значительно большее количество значение этого параметра (рис. 8.2).

Значения параметра  $\Delta f$  для сетей сотовой связи стандартов LTE и NR  
(поколения 4G и 5G)

$\mu$	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15, \text{кГц}$	Тип циклического префикса CP
0	15	Нормальный
1	30	Нормальный
2	60	Нормальный Расширенный
3	120	Нормальный
4	240	Нормальный

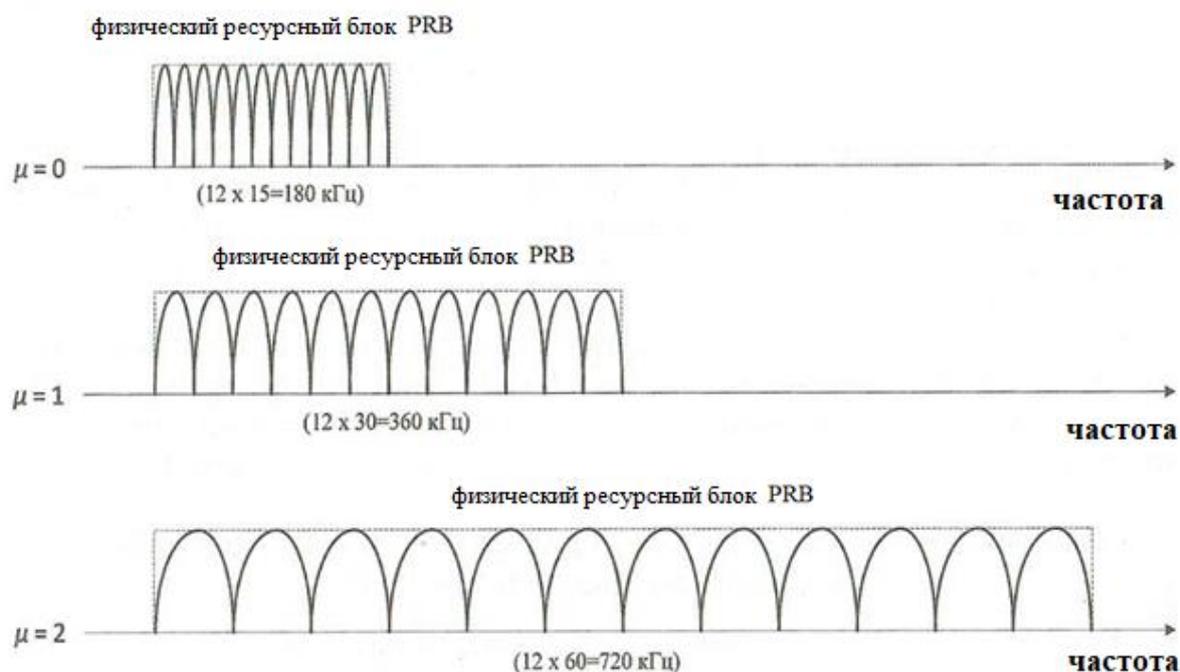


Рис. 8.2. Особенности построения ресурсных физических блоков

Частотно-временной ресурс радиointерфейса стандарта NR согласно терминологии 3GPP называется Resource Grid (ресурсная сетка). Он состоит из ресурсных блоков, которые образуются из ресурсных элементов, имеющих текущий номер  $(k, l)$  (рис. 8.3) [21].

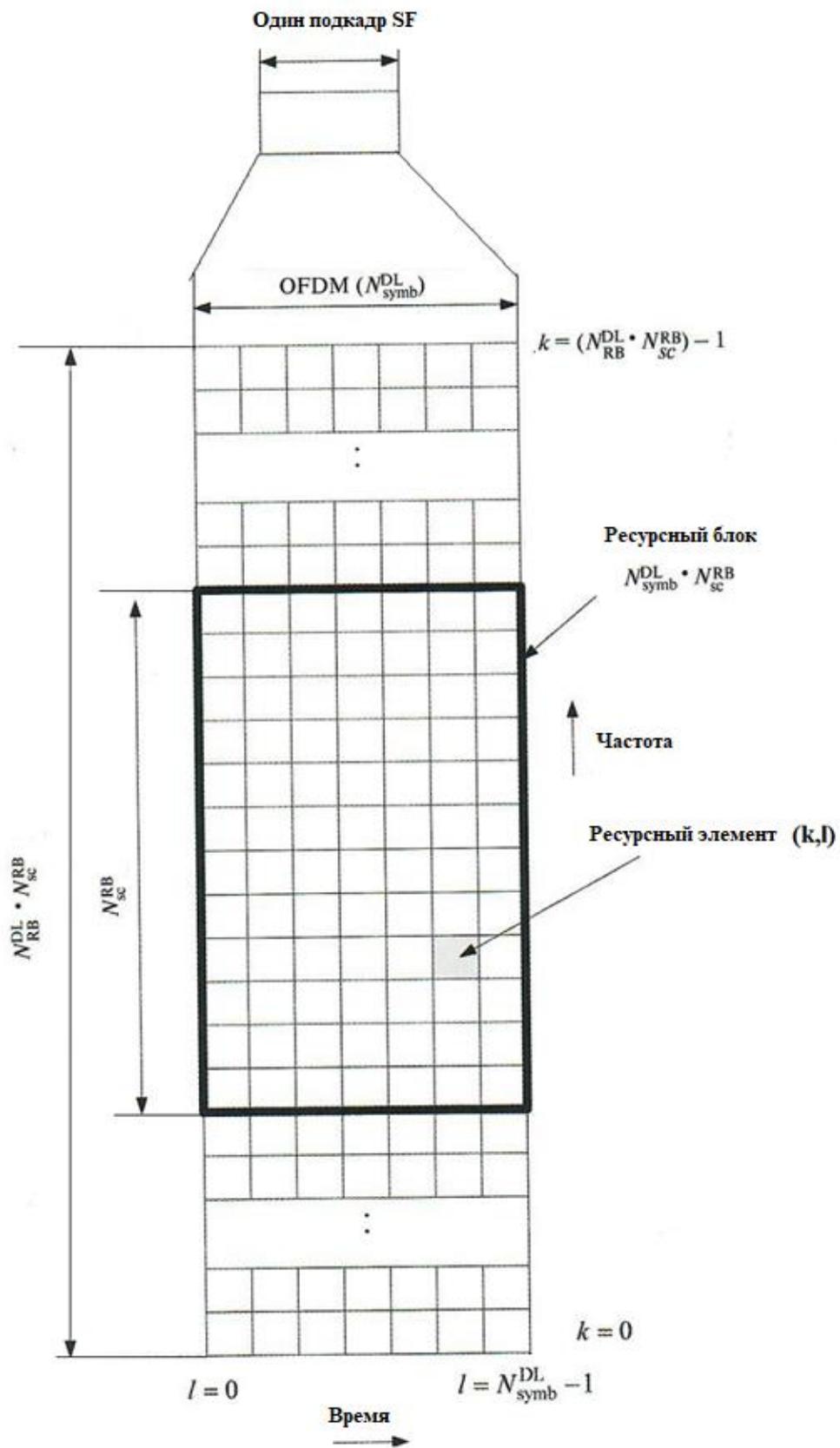


Рис. 8.3. Ресурсная сетка

Временная ось представлена индексом  $l$ , который определяет текущий временной слот. Каждый слот содержит 14 символов OFDM с нормальным циклическим префиксом или 12 символов OFDM с расширенным циклическим префиксом. Длительность символа OFDM зависит от нумерологии  $\mu$ . В свою очередь слоты объединяются в подкадры, что показано на рис. 8.3. Десять последовательных подкадров (Half-Frame) формируют кадр. Каждый кадр состоит из двух подкадров, каждый из которых имеет длительность 5 мс. Таким образом, видно, что временная ось разбивается кадры (Frame). Частотная область (индексация  $k$ ) разбивается на радиоблоки (RB), размер которых зависит от количества поднесущих в нем [21].

Максимальная скорость передачи данных измеряется в гигабитах в секунду и определяется по следующей формуле [21]:

$$V_{\max} = \sum_{i=1}^J \left( N_s^i \cdot Q_m^i \cdot K_c^i \cdot R_c \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{(i, \mu)} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - \text{OH}^i) \right) \cdot 10^{-6}, \quad (8.7)$$

где  $J$  – количество агрегированных частотных полос (компонентных несущих или КС);  $N_s^i$  – количество пространственных потоков, которое определяется типом системы MIMO;  $Q_m^i$  – порядок модуляции (количество символов сигнала), определяемый типом модуляции (обычно от QAM-4 (для данного типа модуляции значение параметра  $Q_m^i = 2$ ) до QAM-256). Для LTE (4G) используется только QAM-64, поэтому для данного типа модуляции значение параметра  $Q_m^i = 8$ ;  $K_c^i$  – масштабный коэффициент, его значение обычно находится в диапазоне от 0,75 до 1;  $R_c$  – относительная скорость кодирования, диапазон от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{948}{1024}$  (для отсутствия кодирования она равна 1);  $N_{\text{PRB}}^{(i, \mu)}$  – количество PRB (блоков физических ресурсов) в полосе частот  $W_i$  с нумерацией  $\mu$  зависит от полосы канала (полосы передачи) и интервала между ними и может изменяться от 11 до

273 для частотного поддиапазона FR1 (450–6000 МГц) и от 32 до 264 для частотного поддиапазона FR2 (24 500–52 600 МГц);  $T_s^\mu$  – средняя длительность OFDM-символа с нумерологией  $\mu$ , определяемая по формуле (8.8);  $OH^i$  – коэффициент, который отражает долю служебной адресной информации в передаваемых данных и принимает следующие значения:  $OH^i = 0,08$  – для линии «вверх» для частотных диапазонов FR1;  $OH^i = 0,10$  – для линии «вверх» для полос частот FR2;  $OH^i = 0,14$  – для нисходящего канала связи для полос частот FR1 (450–6000 МГц);  $OH^i = 0,18$  – для нисходящего канала для частотных полос FR2 (24 500–52 600 МГц).

Параметр  $T_s^\mu$  определяется по формуле [21]

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}, \text{ с.} \quad (8.8)$$

#### **8.4. Методические указания и исходные данные для выполнения практической работы**

В процессе расчетов, которые проводятся по формулам, представленным в подразд. 8.3, необходимо вычислить значение пиковой скорости передачи данных  $V_{\max}$ . Исходные для моделирования выбираются из табл. 8.5–8.7 в соответствии с номером варианта. Для всех вариантов величина параметра  $J$  (число агрегированных частотных полос или компонентных несущих) принимается равным единице. Например, при решении варианта расчета с номером 111 исходные данные будут выглядеть следующим образом: значение параметра нумерологии  $\mu = 1$ , значение числа пространственных потоков  $N_s^i = 2$ , масштабный коэффициент  $K_c^i = 0,75$ , относительная скорость кодирования  $R_c = \frac{1}{2}$ , число ресурсных блоков  $N_{PRB}^{(i, \mu)} = 25$ , параметр  $OH^i = 0,14$ , параметр порядка модуляции  $Q_m^i = 2$ .

Таблица 8.5

Величины параметра нумерологии и числа пространственных потоков

Первая цифра номера варианта	Параметр нумерологии	Число пространственных потоков
1	0	2
2	1	4
3	2	6
4	3	8
5	0	4

Таблица 8.6

Величины параметров для сети сотовой связи 5G

Вторая цифра номера варианта	Масштабный коэффициент	Относительная скорость кодирования	Число ресурсных блоков
1	0,75	1/2	25
2	0,8	2/3	11
3	0,85	7/8	32
4	0,9	3/4	32
5	1	948/1024	52

Таблица 8.7

Величины параметр  $OH^i$  и порядка модуляции для сети сотовой связи 5G

Третья цифра номера варианта	Параметр $OH^i$	Порядок модуляции
1	0,14	2
2	0,08	3
3	0,14	4
4	0,18	6
5	0,1	8

## Практическая работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ СТАНДАРТА IEEE 802.11a

**Цель работы:** исследование основных характеристик оборудования стандарта IEEE 802.11a.

#### 9.1 Краткие теоретические сведения

##### 9.1.1. Модуляция со многими несущими и OFDM

В последнее время метод передачи, называемый «Модуляцией со многими несущими» (Multicarrier – MC), приобрел большую популярность в телекоммуникации. В самом общем смысле MC-модуляция означает не что иное, как привлечение множества параллельных поднесущих (Subcarriers) для передачи символов одного и того же потока данных. Выбор конкретного варианта использования поднесущих может изменяться в зависимости от выдвигаемой цели. В рассматриваемом контексте наиболее интересной является связь между MC-модуляцией и концепцией расширения спектра. Как следует из ранее рассмотренного материала, все достоинства, присущие широкополосности, объясняются большой величиной частотно-временного произведения (выигрышем от обработки, коэффициентом расширения) –  $W \cdot T$ .

Существуют различные способы расширения спектра сигнала при заданной его длительности. Расширение спектра прямой последовательностью решает данную задачу путем замены обычных «медленных» импульсов символов «быстрыми» сигналами некоторой подходящей формы, т. е. управлением полосой сигнала во временной области. MC-модуляция с этой точки зрения может рассматриваться как альтернативный метод расширения спектра путем его прямого формирования в частотной области.

### 9.1.2. Метод CDMA с прямым расширением спектра и многими несущими

Простейшим вариантом реализации MC-метода в CDMA является обычное частотное мультиплексирование данных одного и того же пользователя. Оно осуществляется путем передачи демультиплексирования потоков данных с прямым расширением спектра на  $M_c$  поднесущих с неперекрывающимися спектрами сигналов. На рис. 9.1 поясняется этот способ передачи, называемый «CDMA-методом с прямым расширением спектра и многими несущими» (Multicarrier DS – CDMA или MC – DS – CDMA).

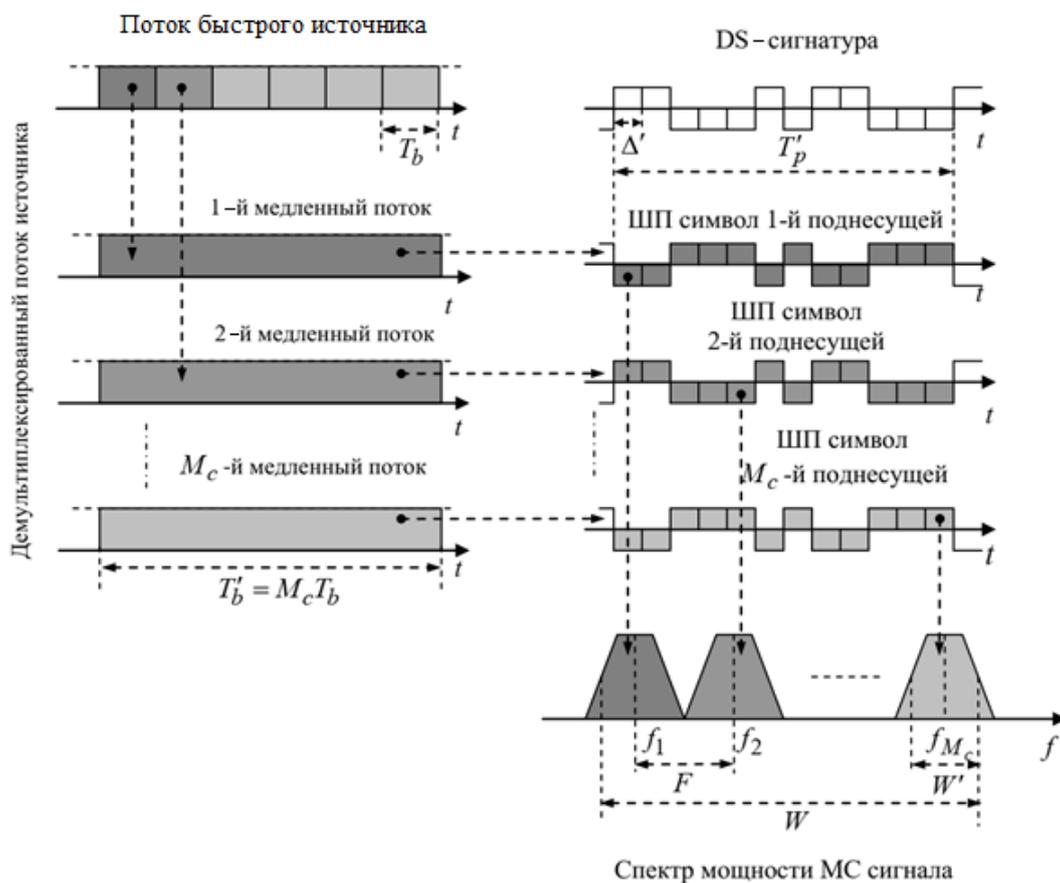


Рис. 9.1. Принцип метода MC – DS – CDMA

Источник «быстрого» потока данных со скоростью  $R = \frac{1}{T_b}$  демультиплексируется (разделен на части) в  $M_c$  параллельных «медленных» битных потоках со

скоростью  $\frac{R}{M_c}$  (или длительностью бита  $T_b' = M_c \cdot T_b$ ) каждый. Медленный  $i$ -й поток бит передается на своей поднесущей частоте  $f_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M_c$  с использованием прямого расширения спектра и выбранного вида модуляции данных (бинарной ФМ, квадратурной или др.). При длительности чипа расширяющей последовательности  $\Delta'$  и длительности символа данных, передаваемого на поднесущей  $T_p'$ , полоса и коэффициент расширения спектра сигнала на поднесущей составляют  $W' \approx \frac{1}{\Delta'}$  и  $N' = \frac{T_p'}{\Delta'} \approx W' \cdot T_p'$  соответственно. Выбор параметра  $F$  для соседних поднесущих частот должен исключать перекрытие спектров, т. е. удовлетворять ограничению  $F = W' + F_g$ , где  $F_g$  – защитный интервал, отводимый для внеполосных боковых лепестков спектра. Таким образом, полная полоса, занимаемая системой, составит

$$W = (M_c - 1) \cdot F + W' = M_c \cdot W' + (M_c - 1) \cdot F_g. \quad (9.1)$$

Приемник MC – DS – CDMA системы состоит из  $M_c$  параллельных идентичных приемных каналов, каждый из которых настроен на свою собственную поднесущую и осуществляет обработку сигнала независимо от других. Затем демодулированные медленные битные потоки с их выходов мультиплексируются для восстановления переданного источником быстрого битного потока. Сравнение данной системы с обычной DS – CDMA, занимающей такую же общую полосу  $W$  и имеющую такую же скорость передачи данных  $R$ , показывает, что вследствие необходимости введения защитных интервалов MC – DS – CDMA система уступает DS – CDMA системе в коэффициенте расширения. Если обе системы используют один и тот же вид модуляции, то длительность символа  $T_p$  в DS – CDMA системе должна быть в  $M_c$  раз короче, чем аналогичная характеристика  $T_p'$  в MC – DS – CDMA. Однако длительность чипа в DS – CDMA может быть взята равной  $\Delta \approx \frac{1}{W}$ , что обеспечивает коэффициент расширения

$N = \frac{T_p}{\Delta} \approx \frac{W \cdot T_p'}{M_c}$ . Тогда согласно формуле (9.1) отношение данной характеристики к коэффициенту расширения MC – DS – CDMA составит

$$\frac{N}{N'} = 1 + \frac{M_c - 1}{M_c} \frac{F_g}{W'} = 1 + \frac{(M_c - 1) \cdot F_g}{W - (M_c - 1) \cdot F_g}, \quad (9.2)$$

что значительно превосходит единицу. Поскольку коэффициент расширения спектра является наиболее важным параметром CDMA, определяющим абонентскую емкость, помехоустойчивость и пр., MC – DS – CDMA оказывается не лучшим потенциальным способом утилизации доступного спектрального ресурса. Однако иногда могут перевесить и другие факторы, как это имеет место в спецификации cdma2000, рекомендующей MC – DS – CDMA для организации прямого канала на основании взаимной совместимости с cdmaOne.

### **9.1.3. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением**

Более эффективной системой является мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – OFDM. При реализации этой технологии вся полоса пропускания канала разделена на множество поднесущих или вспомогательных несущих. Число этих поднесущих может быть достаточно. Например, в стандарте 802.11 используются от 52 до 484 поднесущих. Число поднесущих зависит от режима работы и ширины частотного канала. Некоторые из поднесущих являются вспомогательными (пилотными) и используются для синхронизации передачи и декодирования данных по основным (информационным) несущим.

Формируемые поднесущие являются ортогональными, а значит, передача информации на каждой из них не влияет на передачу информации на соседних. Это вытекает из того, что математически ортогональность означает равенство

нулю скалярных произведений сигналов разных поднесущих, т. е. если при передаче одна из поднесущих сместится по частоте и займет место другой поднесущей, то при демодуляции OFDM-символа в приемнике сигнал на последней будет равен нулю, что показывает отсутствие межканальной интерференции таких сигналов.

Физически ортогональность несущих сигналов обеспечивается, когда за время длительности одного символа несущий сигнал будет совершать целое число колебаний.

Как показано на рис. 9.2, центры поднесущих размещены так, что максимум энергии одной поднесущей совпадает с минимумами других поднесущих, несмотря на то что их сигналы частично пересекаются в частотном спектре. Такое размещение позволяет более эффективно использовать доступную полосу частот. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением также называют «Модуляцией с множеством несущих».

Передача данных ведется одновременно всеми поднесущими. Исходящий высокоскоростной поток данных разбивается в передатчике на  $n$  низкоскоростных потоков  $x[n]$  ( $n$  – число поднесущих), каждый из которых модулируется своей отдельной поднесущей с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), переводящего предварительно мультиплексированный на каждой поднесущей сигнал из частотного представления во временное. Суть этого преобразования сводится к умножению информационных сигналов  $x[n]$  на соответствующие поднесущие и объединению их в один сигнал (рис. 9.2, а). Такое преобразование позволяет вместо широкополосного сигнала получить набор узкополосных сигналов, составляющих так называемый OFDM-символ (рис. 9.2, б). Достоинством такого преобразования является то, что при наличии узкополосной помехи будет искажена одна или несколько поднесущих, а не весь сигнал в целом, что существенно уменьшит количество ошибок, получаемых на выходе приемника (декодера).

Далее этот сигнал переносится на несущую частоту и излучается антенной устройства. Вид передаваемого OFDM-сигнала во времени показан на рис. 9.2, в. В общем случае он состоит из суммы периодических функций разной частоты, число которых равно числу поднесущих. В приемнике OFDM-сигнал дополнительно искажается шумами приемных каскадов и помехами радиоэфира и представляет собой совокупность синусоид, меняющихся во времени сложным и случайным образом.

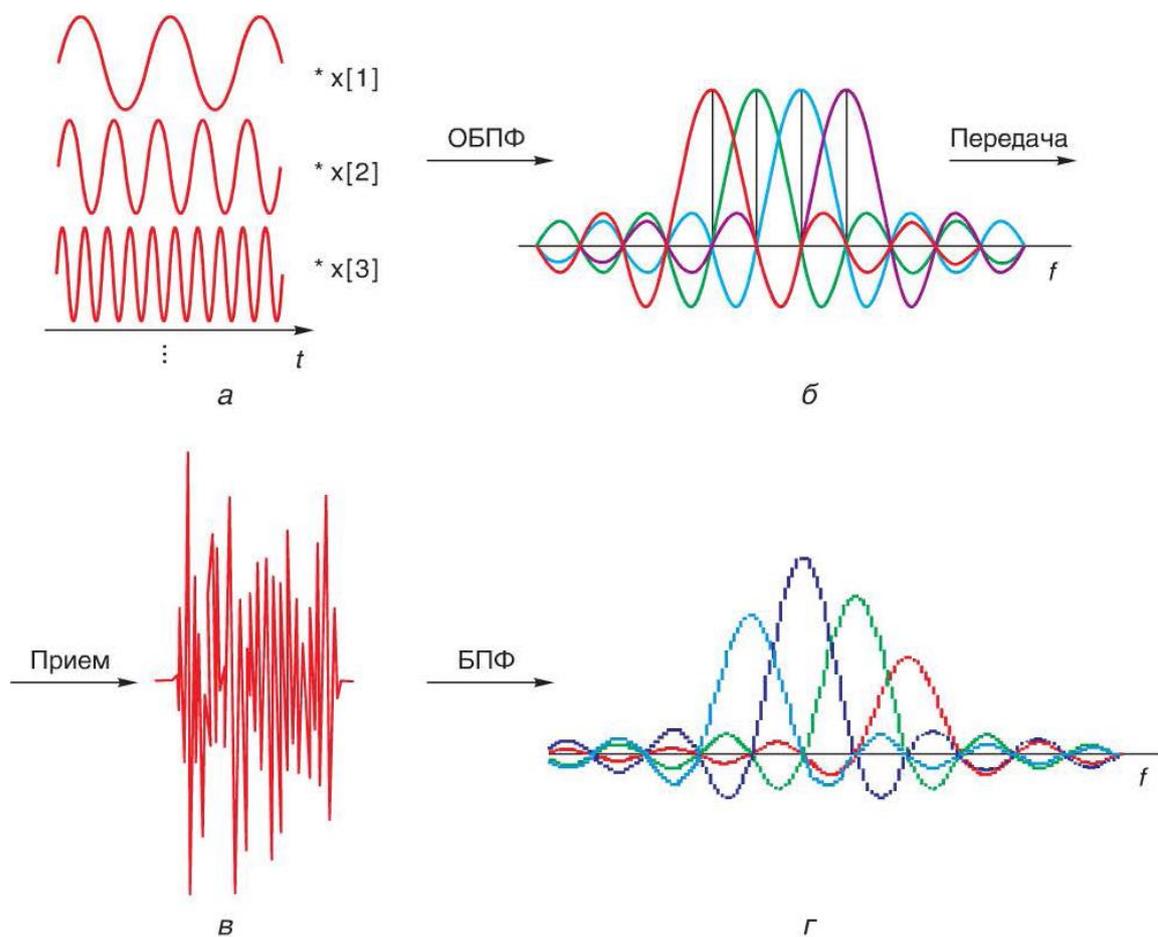


Рис. 9.2. Передача OFDM-символа:

*a* – форма поднесущих информационных потоков; *б* – форма OFDM-символа при передаче; *в* – вид принимаемого радиочастотного сигнала; *г* – форма OFDM-символа при приеме

Искажения изменяют форму спектра, ослабляя сигнал на некоторых поднесущих, что приводит к ошибкам демодуляции сигнала (рис. 9.2, з). Успех демодуляции зависит от величины этого ослабления.

При приеме после устранения несущей радиочастоты над сигналом выполняется быстрое преобразование Фурье (БПФ), при котором все поднесущие извлекаются одновременно. Далее каждая из них подается на демодуляторы, на выходе каждого из которых выделяется  $n$ -й поток бит данных.

В отличие от уже рассмотренных физических уровней OFDM позволяет бороться с негативными последствиями многолучевого распространения. В результате интерференции складываются сигналы, представляющие разные биты, что приводит к повреждению данных. Межсимвольная интерференция оказывает значительное влияние на форму получаемого сигнала при высоких скоростях передачи ввиду малости расстояния между символами.

Для борьбы с межсимвольной интерференцией и интерференцией между поднесущими (возникает в результате сдвига центра поднесущей частоты) в OFDM используется защитный, или охранный интервал Guard Interval – GI. Обычно в качестве защитного интервала используют так называемый циклический префикс, представляющий собой циклическое повторение окончания OFDM-символа.

Он добавляется перед передаваемым OFDM-символом в передатчике и удаляется при приеме символа в приемнике. Наличие защитного интервала создает временные паузы между отдельными символами, и если его длительность превышает максимальное время задержки сигнала в результате многолучевого распространения, то межсимвольной интерференции не возникает.

При этом защитный интервал большой длительности снижает скорость передачи данных, что усложняет задачу выбора оптимальной длительности защитного интервала.

#### 9.1.4. Описание лабораторного макета

Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11a показан на рис. 9.3.

Его схема содержит следующие блоки и субблоки.

На входе располагается генератор Random Sym (1), который обеспечивает скорость передачи 12 Мбит/с. Он имеет следующие параметры: число символов (Number of Symbols) – 2, т. е. входные данные являются обычной бинарной последовательностью, режим синхронизации – внутренний (Internal Timing mode). Скорость следования символов определяется переменной BitRate в блоке (7). Время старта равно 0 с.

Блок (2) Scramble & Encode предназначен для выполнения большого числа операций: скремблирования, сверточного кодирования, сжатия, перемежения и группирования входных данных в дибиты (двойные биты), которые поступают с источника (1).

Блок (2) содержит следующие блоки, которые представлены на рис. 9.4. Скремблер (1) построен по схеме с использованием 7-разрядного регистра с обратными связями. Вход для данных – data, вход и выход синхронизации – ск. Клемма [InitVal] необходима для снятия кода инициализации регистра и используется только в режиме Internal (внешний). Клемма Reset необходима для обнуления регистра и производится одиночным импульсом с генератора (6) в момент запуска моделирования. Клемма out представляет выход схемы.

Могут быть использованы следующие режимы: Register Initialization – режим синхронизации регистра: внешний (External) по входу [InitVal] или внутренний (Internal) с использованием выбранного значения параметра Register Init Value (рис. 9.4).

Сверточный кодер (2) имеет значение параметра Constraint Length (величина  $k = 7$ ) и относительную скоростью кодирования  $R = \frac{1}{2}$ .

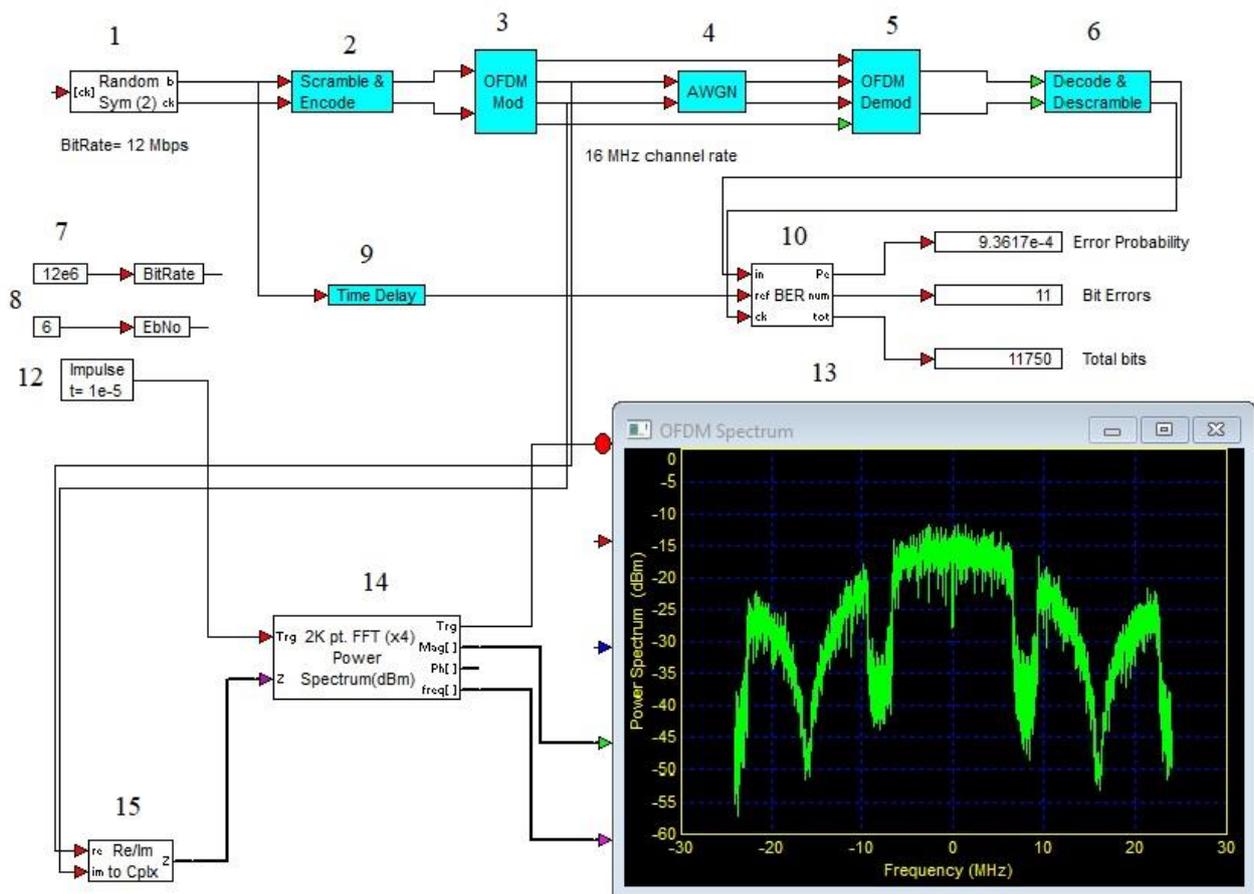


Рис. 9.3. Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11a

Преобразователь (3) выходного сигнала преобразует сигнал из сверточного кодера (2) в последовательный код и обеспечивает его сжатие. Скорость выходного кода (Code Rate) составляет величину  $Rate = \frac{1}{2}$ , а скорость входного кода определяется переменной BitRate в поле строки Input Symbol Rate блока (3).

Перемежитель (4) и преобразователь (5) преобразуют сигналы в виде последовательного кода в двухбитные символы (дибиты).

Далее сигнал поступает на блок OFDM mod (3), который выполняет все процедуры при OFDM.

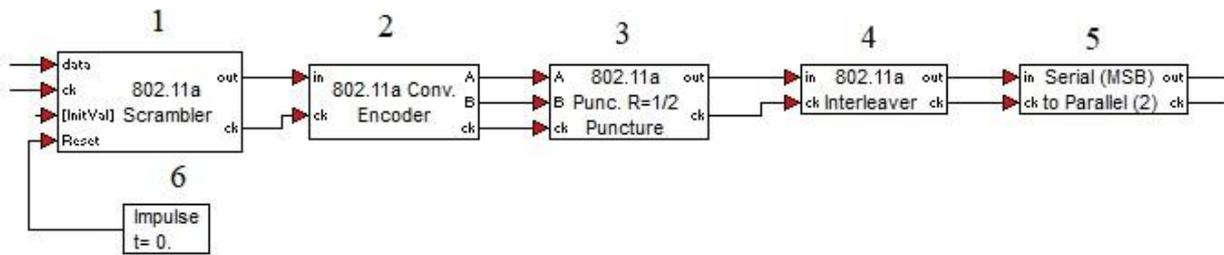


Рис. 9.4. Структурная схема субблока Scramble & Encode

Блок (3) OFDM Mod предназначен для квадратурно-фазовой манипуляции потока дибитов с субблока (2) (см. рис. 9.3) и их ортогонального разделения. Данный блок (рис. 9.5) содержит следующие устройства.

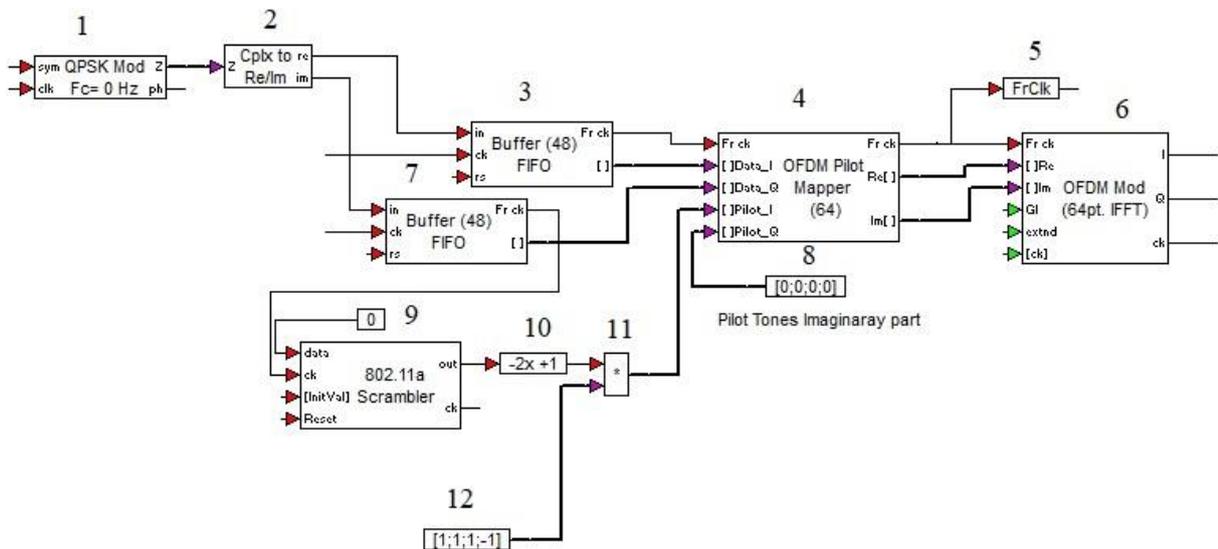


Рис. 9.5. Структурная схема блока OFDM Mod

Первым блоком является модулятор (1), выходной комплексный сигнал которого блоком (2) разделяется на два ортогональных сигнала – действительную и мнимую составляющие. Далее располагаются буферы (3) и (7) для формирования фреймов (блоков) размером 48 бит для каждой составляющей фазоманипулированного сигнала (определяется скоростью 12 Мбит/с) и сопровождающих

их тактовых сигналов (выход Fr sk). Блок (4) OFDM-модулятора выполняет функции анализа составляющих действительной Re (Q) и мнимой Im (I), поступающих с буферов (3) и (7). Далее в этом блоке происходит сопоставление полученных потоков данных с данными контрольного пилот-сигнала, действительная часть которого представляет 4-элементный векторный сигнал и формируется источником (8), а мнимая – источником (12). Выходной вектор сигнала перемножается в блоке (11) с тактовым сигналом блока (7). Операция скремблирования выполняется в блоке (9) при нулевом входном сигнале на входе data. Далее выполняется усиление и инвентирование сигнала в блоке (10). Формируемый на выходе блока (4) тактовый сигнал кадра передается сигналом (5), он может быть использован в других узлах.

OFDM-модулятор (6) работает в режиме без охранного интервала (Guard Interval) и формирует 52 поднесущих (из 64 возможных определяемых параметром FFT Size – количеством выборок обратного БПФ). Причем из этого количества только 48 используются для переноса фрейма данных размером в 48 бит.

С выхода блока OFDM mod сигнал поступает в канал с белым гауссовским шумом AWGN (рис. 9.6).

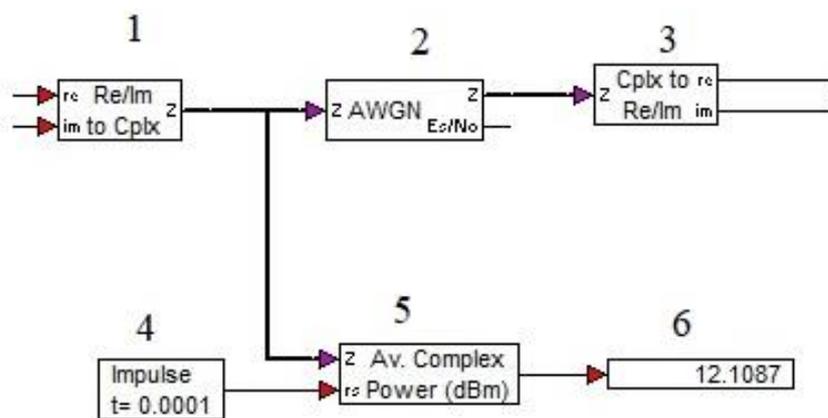


Рис. 9.6. Структурная схема субблока AWGN

Схема этого блока содержит преобразователи входного (1) и выходного (3) сигналов, непосредственно сам блок тракта AWGN (2), источник импульсного сигнала (4), измеритель выходного уровня (дБм) (5) и индикатор (6).

С выхода канала AWGN сигнал поступает на блок OFDM demod (рис. 9.7), где производятся сигнальные процедуры, которые являются обратными тем процедурам, которые выполняются в приемной части оборудования.

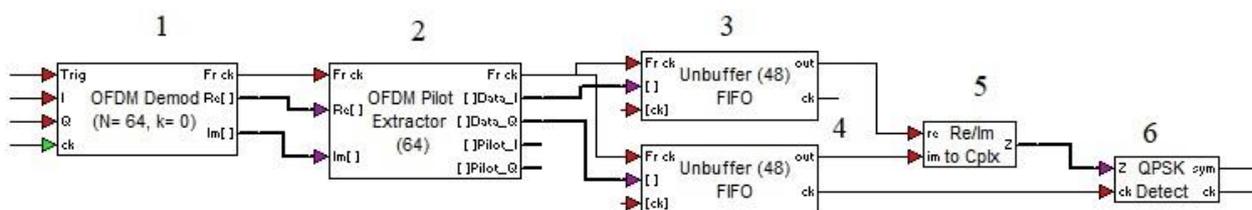


Рис. 9.7. Структурная схема субблока OFDM Demod

Субблок (1) демодулятора (OFDM Demod) (см. рис. 9.7) предназначен для демодуляции OFDM-сигналов, поступающих с субблока (3) (см. рис. 9.3) канала передачи. Он содержит OFDM-демодулятор (1) с его контроллером (2). Значение параметра  $k = 0$  указывает на отсутствие защитного интервала. Далее по схеме блока располагаются преобразователи (3) и (4) параллельного кода в последовательный. Блок (5) преобразует сигнал в комплексную форму. Детектор (6) производит детектирование фазоманипулированного сигнала. Он выполняет операции декодирования и дескремблирования Decode and Descramble (рис. 9.8). Содержит следующие блоки: преобразователь параллельного кода в последовательный (1), депережежитель (2), депунктуатор (3), декодер Витерби (4), дескремблер (5).

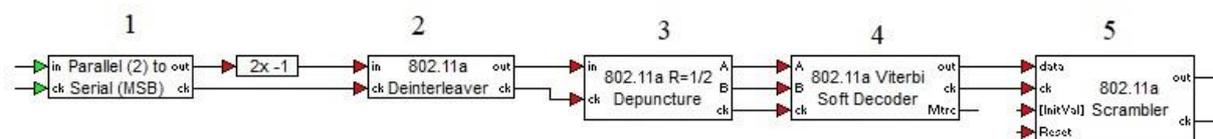


Рис. 9.8. Структурная схема субблока Decode and Descramble

Группа измерительных приборов и устройств на рис. 9.3 представлена анализатором спектра (14) с плоттером (OFDM Spectrum) (13), многофункциональным плоттером BERnum, или графопостроителем (Plot), который позволяет измерять коэффициент ошибок (10), линией задержки (9), преобразователем сигнала (15) и источником импульсного сигнала (12). Кроме того, в составе блока AWGN присутствует измеритель выходного уровня (дБм) (5) и индикатор (6) (см. рис. 9.6). С помощью прибора (13) воспроизводится форма спектра сигнала на выходе блока OFDM Mod, а измерительный прибор (10) измеряет коэффициент ошибок в тракте лабораторного стенда (см. рис. 9.3).

## 9.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера.

2. В меню File выбрать опцию Open. На диске C (или другом – по указанию преподавателя) открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, Wireless, BPSK\_OFDM\_BER. Загрузить файл BPSK\_OFDM\_BER. Представленный пример позволяет изучить особенности функционирования оборудования IEEE 802.11a, которое использует технологию OFDM.

Верхний многофункциональный плоттер, или графопостроитель, в приведенном примере называется BERnum (устройство (10) на рис. 9.3). Данное

устройство позволяет измерить зависимость количества корректируемых ошибок. Этим прибором выводятся значения трех параметров: общее количество переданных символов (Total bits), количество обнаруженных ошибок (Bit Errors) и непосредственно значение коэффициента ошибки как отношение количества обнаруженных ошибок к общему количеству переданных символов (Error Probability). Нижний плоттер (OFDM Spectrum) показывает полученную спектральную характеристику на выходе OFDM-модулятора (OFDM mod) (устройство (13) на рис. 9.3).

Исследовать зависимость коэффициента ошибок от величины параметра  $E_s/N_0$  – отношения сигнал/шум для тракта AWGN. Для этого подвести курсор к полю AWGN (см. рис. 9.3) и после появления значка  $\leftrightarrow$  нажать правую кнопку компьютерной мыши. При этом открывается схема блока AWGN (см. рис. 9.6). Далее снова подвести курсор к полю AWGN и после появления значка  $\leftrightarrow$  нажать правую кнопку компьютерной мыши. После этих манипуляций открывается окно настройки блока AWGN. В строке Run 1 вместо символов  $E_s/N_0 + 4,77$  установить значение отношения сигнал/шум, равное 1 дБ. Нажать кнопку ОК. Затем перейти на уровень начальной схемы (см. рис. 9.3). Для этого в левом рабочем окне экрана с помощью курсора выбрать верхнюю строчку в списке файлов и нажать левую кнопку компьютерной мыши. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера (OFDM Spectrum) (13) можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. С помощью кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. Зафиксировать значение коэффициента ошибки в отчете. Аналогичные измерения выполнить и при других значениях  $E_s/N_0$  в диапазоне значений от 1 до 10 дБ с шагом 1 дБ. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить зависимость коэффициента ошибки от величины параметра  $E_s/N_0$  и проанализировать ее.

При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера OFDM Spectrum. Для этого подвести курсор к полю OFDM Spectrum (см. рис. 9.4) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера. На панели Options включены параметры со следующими выбранными значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы), X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии). Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – 0, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – –60, X Upper Bound (верхняя граница по X) – 30, X Lower Bound (нижняя граница по X) – –30, Time Scaling (масштаб времени) – None (нет), Sub Plot Count (указатель количества дополнительных рабочих областей) – 1. Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому они здесь подробно не рассмотрены. Для получения более детального изображения спектра можно произвести изменение указанных выше параметров, подбирая их под тот участок спектра, где необходима детализация. В частности, в программе по оси X фиксируются и отрицательные значения частоты, которые в реальных приборах, связанных с измерением спектра, отсутствуют. При необходимости можно выполнить стирание полученного изображения. Для этого необходимо снова войти в Plot Properties и на панели Options нажать кнопку Clear Overplot.

3. Исследовать зависимость формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений параметров блока QPSK Mod, который входит в состав блока OFDM Mod (рис. 9.4). Для этого подвести курсор к полю OFDM Mod и после появления значка  нажать правую кнопку компьютерной мыши, открывается схема блока OFDM Mod (см. рис. 9.5). Далее подвести курсор к полю блока QPSK Mod и после появления значка  нажать правую кнопку компьютерной мыши, после чего открывается окно настройки этого блока. Установить значение амплитуды сигнала (Amplitude), равное 0,1 В. Нажать кнопку ОК. Затем

перейти на уровень начальной схемы (см. рис. 9.3). Для этого в левом рабочем окне экрана с помощью курсора выбрать верхнюю строчку в списке файлов и нажать левую кнопку компьютерной мыши. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера (OFDM Spectrum) можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера. Для этого подвести курсор к полю OFDM Spectrum (блок (13) на рис. 9.3) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера и произвести необходимые изменения по методике, которая была описана выше. С помощью компьютерной кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. Зафиксировать значение коэффициента ошибки в отчет. Аналогичные измерения выполнить и при других значениях амплитуды сигнала в диапазоне значений от 0,1 до 1 с шагом 0,2 В. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра амплитуды сигнала. Занести данные в отчет, сделать выводы.

4. Исследовать зависимость формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений параметра разбаланса фазы (Phase Imbalance) блока QPSK Mod. Установить значение разбаланса фазы (Phase Imbalance), равное 2°. Нажать кнопку ОК. Затем перейти на уровень начальной схемы (см. рис. 9.3). Для этого в левом рабочем окне экрана с помощью курсора выбрать верхнюю строчку в списке файлов и нажать левую кнопку компьютерной мыши. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера (OFDM Spectrum) можно будет

наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. С помощью компьютерной кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера. Для этого подвести курсор к полю OFDM Spectrum (блок (13) на рис. 9.3) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера и произвести необходимые изменения по методике, которая была описана выше. Аналогичные измерения выполнить при значениях разбаланса фазы в диапазоне от 2 до 20° с шагом 4°. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра амплитуды сигнала. Занести данные в отчет, сделать выводы.

5. Исследовать зависимость формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений скорости передачи – параметра BitRate. Для этого подвести курсор к полю блока BitRate (см. рис. 9.3) и после появления значка  нажать правую кнопку компьютерной мыши, открывается окно const Properties. В нем открыть окно value, набрать значение скорости передачи, равное 1E + 06, т. е. значение скорости передачи, равное  $1 \cdot 10^6$  бит/с = 1 Мбит/с. Нажать кнопку ОК. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера (OFDM Spectrum) можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. С помощью компьютерной кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера. Для этого подвести курсор к полю OFDM Spectrum (блок (13) на рис. 9.3) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера и произвести необходимые изменения по методике, которая была описана выше. Аналогичные

измерения выполнить при значениях скорости передачи в диапазоне от 2 до 12 Мбит/с с шагом 2 Мбит/с. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра скорости передачи.

6. В меню File выбрать команду Close. Сделать выводы. Выйти из программы, выключить компьютер.

### **9.3. Содержание отчета**

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы исследованных блоков.
2. Полученные графические зависимости.
3. Выводы по проделанной работе.

### **9.4. Контрольные вопросы**

1. Опишите особенности исследования основных характеристик оборудования стандарта IEEE 802.11a.
2. Опишите суть модуляции со многими несущими.
3. Опишите метод CDMA с прямым расширением спектра и многими несущими.
4. Опишите суть и особенности использования метода мультиплексирования с ортогональным частотным разделением.
5. Опишите лабораторный макет при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11a.
6. Опишите исследования зависимости формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений параметров блока QPSK Mod.
7. Опишите исследования зависимости формы спектра, коэффициента ошибок от значений скорости передачи параметра BitRate.

## Практическая работа № 10

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ СТАНДАРТА IEEE 802.11b

*Цель работы:* исследование основных характеристик оборудования стандарта IEEE 802.11b

### 10.1. Краткие теоретические сведения

#### 10.1.1. Особенности реализации методов широкополосной передачи оборудования стандарта IEEE 802.11b

В случае применения радиоканалов для реализации методов широкополосной передачи используются методы DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – прямое расширение спектра и FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – расширение спектра посредством метода частотных скачков. Для модуляции сигнала FHSS на скорости 1 Мбит/с используется частотная GFSK-2, а на скорости 2 Мбит/с – GFSK-4. GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) – гауссовская частотная манипуляция, в которой каждый уровень входного сигнала преобразуется в сигнал определенной частоты, а исходные цифровые сигналы пропускаются через специальный низкочастотный фильтр со специально подобранной полосой пропускания для обеспечения требуемой характеристики спектра. В случае GFSK-2 используют два значения частоты, а в случае GFSK-4 – четыре значения. При реализации DSSS на скорости 1 Мбит/с используется BPSK (Binary Phase Shift Keying) – бинарная фазовая манипуляция, а на скорости 2 Мбит/с – QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурная фазовая манипуляция.

В диапазоне 2,4 ГГц для беспроводной сети выделена полоса частот шириной в 83 МГц, которая в случае DSSS и скорости передачи 11 Мбит/с делится на 14 каналов. Для того чтобы несколько каналов могли использоваться одновременно в одной и той же местности, необходимо, чтобы они не перекрывались и

отстояли друг от друга на 25 МГц для исключения взаимных помех. Поскольку в таких условиях невозможно решить проблему отстройки от помех автоматическим изменением частоты, то в беспроводных локальных сетях в режиме DSSS используется кодирование с высокой степенью избыточности. В ситуации, когда и эта мера не позволяет обеспечить заданную достоверность передачи, скорость с максимального значения 11 Мбит/с последовательно снижается до значений 5,5; 2 или 1 Мбит/с.

Снижение скорости происходит не только при высоком уровне помех, но и в случае увеличения расстояния между элементами беспроводной сети. Поэтому в случае DSSS для повышения помехозащищенности перед модуляцией каждый информационный символ представляется 11-разрядным кодом Баркера вида 11100010010, тогда для передачи единичного и нулевого символов используются прямая и инверсная последовательности соответственно. Для модуляции несущего колебания в этом случае применяются уже не исходные символы сообщения, а прямые или инверсные последовательности Баркера. Несмотря на то что интенсивность 11-битной посылки близка к фоновой, полезный сигнал в приемнике удастся выделить на фоне шума благодаря тому, что при приеме последовательность посылок декодируется по тому же алгоритму, что и в передатчике (в приемнике полученный сигнал умножается на код Баркера), в результате чего полезный сигнал становится узкополосным, поэтому его фильтруют в узкой полосе частот, равной удвоенной скорости передачи. В то же время любая помеха после умножения на код Баркера, наоборот, становится широкополосной, поэтому в узкую полосу пропускания попадает лишь часть помехи, примерно в 11 раз меньшая по мощности помехи, чем действующая на входе приемника.

По сравнению с FHSS метод DSSS позволяет достичь большей производительности, обеспечивает большую устойчивость к помехам (поскольку выбором поддиапазона для передачи удастся отстроиться от помех) и большую дальность связи, особенно в случае наружного применения.

При использовании метода FHSS полоса 83 МГц делится на 79 каналов шириной 1 МГц каждый. При этом передатчик и приемник согласовывают схему каналов (на выбор имеется 22 такие схемы), и данные посылаются последовательно по различным каналам с использованием выбранной схемы. Каждая передача данных в сети 802.11b происходит по разным схемам переключения, а сами схемы разработаны таким образом, чтобы минимизировать случаи одновременного использования одного канала. Метод FHSS позволяет использовать простую схему приемопередатчика, однако ограничен максимальной скоростью 2 Мбит/с из-за ограниченной полосы частот в 1 МГц на канал. Таким образом, в каждый момент времени каждый передатчик использует только один из каналов, перескакивая с одного канала на другой через определенные промежутки времени, не превышающие 20 мс. Эти скачки происходят синхронно на передающей и приемной стороне в известной обоим сторонам псевдослучайной последовательности. Другая пара передатчик – приемник должна использовать другую последовательность переключения частот, заданную независимо от первой. Если на каком-нибудь из 79 каналов передаваемый пакет не принят, приемник выдает сообщение и передача пакета повторяется на одном из следующих каналов (на другой частотной позиции).

Спецификация пакетирования данных, предусмотренная стандартом, предписывает разбивку данных на пакеты, снабженные контрольной и адресной информацией (последняя занимает около 30 бит). После адресного блока следует блок длиной до 2048 бит, затем – 4-битный CRC-код информационного блока. Стандарт рекомендует использовать пакеты в 400 бит для физического канала типа FHSS и 1500 или 2048 бит – для физического канала DSSS. Основное дополнение, внесенное в спецификацию 802.11b базового стандарта на физическом уровне, – это поддержка скоростей передачи данных 5,5 и 11 Мбит/с, что сравнимо с проводной сетью 10 BaseT Ethernet. Для достижения таких скоростей был выбран метод DSSS, так как метод частотных скачков в силу ограничений FCC не может поддерживать более высокие скорости. Из этого следует, что системы

802.11b совместимы с системами DSSS 802.11 и несовместимы с системами FHSS 802.11.

### 10.1.2. Описание лабораторного макета

Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11b показан на рис. 10.1.

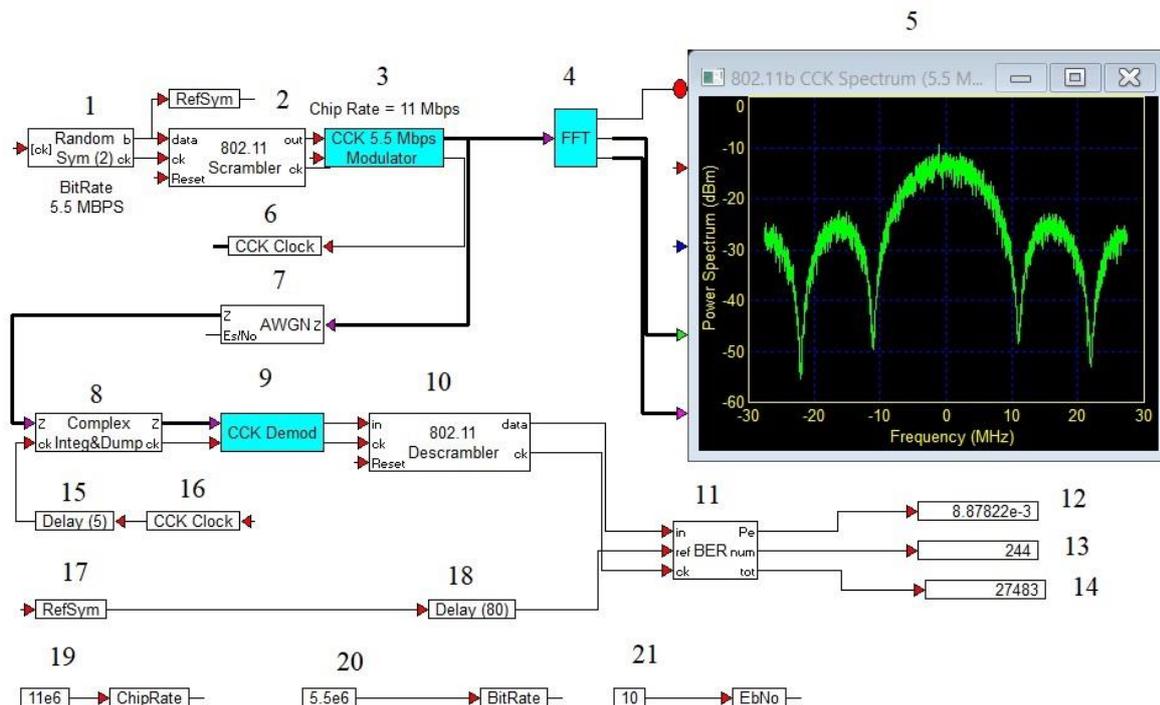


Рис. 10.1. Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11b

Здесь рассматривается пример использования модулятора ССК (Complementary Code Keying) для формирования квадратурных фазоманипулированных (QPSK) сигналов при скорости 5,5 Мбит/с и дифференциально-квадратурных фазоманипулированных (DQPSK) – при скорости 11 Мбит/с.

Схема включения модулятора/демодулятора содержит следующие блоки и

субблоку. Источником входных данных (равномерно распределенных случайных символов) является генератор Random Sym (1), который обеспечивает битовую скорость 5,5 Мбит/с. Параметры этого блока следующие: число символов – 2, т. е. входные данные являются обычной бинарной последовательностью, режим синхронизации – внутренний, скорость следования символов – 12 Мбит/с (блок 20), время старта – 0 с.

Субблок 2 Scramble предназначен для скремблирования входных данных.

Субблок 3 ССК 5.5 Mbps Modulator модулятор содержит буферный каскад (1) (рис. 10.2), который предназначен для формирования из входного бинарного потока 4-битных кадров. Они передаются непосредственно в модулятор ССК (8,4) Baseband Modulator (2), а затем и на выход схемы через согласующее устройство (3).

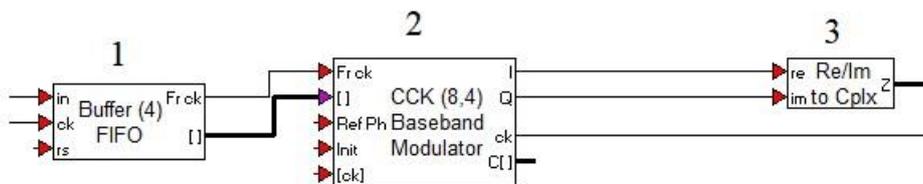


Рис. 10.2. Структурная схема модулятора ССК 5.5 Mbps Modulator

Выходной сигнал после выполнения процедуры быстрого преобразования Фурье (4) (см. рис. 10.1) можно наблюдать на анализаторе спектра (5). Скорость выходного потока задается устройством Chip Rate (19) и по умолчанию составляет 11 Мбит/с.

С выхода блока модулятора ССК 5.5 Mbps Modulator сигнал поступает в канал с белым гауссовским шумом AWGN (7) и на устройство тактовой синхронизации (6) ССК clock. Схема блока (7) содержит ряд изменяемых параметров, которые используются при выполнении практической работы.

С выхода канала AWGN сигнал поступает на блок ССК demod (9) через согласующее устройство (8).

Заключительным сигнальным блоком на рис. 10.1 является блок (10), который выполняет операции дескремблирования (802.11 Descramble).

Группа измерительных приборов и устройств на рис. 10.1 представлена анализатором спектра с плоттером (ССК Spectrum) (5), многофункциональным плоттером BERnum, или графопостроителем (Plot), который позволяет измерять коэффициент ошибок (11), линиями задержки (15) и (18), устройством (21), которое необходимо для установки отношения сигнал/шум –  $E_s/N_0$ , и рядом вспомогательных индикаторных устройств (12), (13), (14). С помощью прибора (5) воспроизводится форма спектра сигнала на выходе блока ССК Mod, а измерительный прибор (11) измеряет коэффициента ошибок в тракте лабораторного стенда.

Внешний вид лабораторной панели при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11b, в котором используется дифференциальная бинарнофазовая манипуляция (DBPSK) и код Баркера, показан на рис. 10.3. Рассматриваемый тракт лабораторной панели представлен в демонстрационном файле IEEE 802.11b\_DBPSK.vsm.

Сигнал из блока (1) подвергается скремблированию в блоке (3), а затем поступает в модулятор DBPSK mod (4). С его выхода сигнал перемножается в блоке 24 с 11-битным кодом Баркера (блок 7) и подается в канал AWGN (8) через блок FFT (5) на анализатор спектра (6).

В приемной части тракта сигнал с выхода канала AWGN (8) поступает на перемножитель (25), на второй вход которого поступает сигнал с аналогичного генератора кода Баркера (9), который управляется тактовым генератором (12). С выхода блока (25) сигнал поступает на вход интегратора (10), а затем и на вход детектора DBPSK det (11). После дескремблера (16) следует измерительный прибор (17) с группой индикаторов (18, 19, 20), которые позволяют измерить коэффициент ошибки тракта, как это было описано для схемы (см. рис. 10.1).

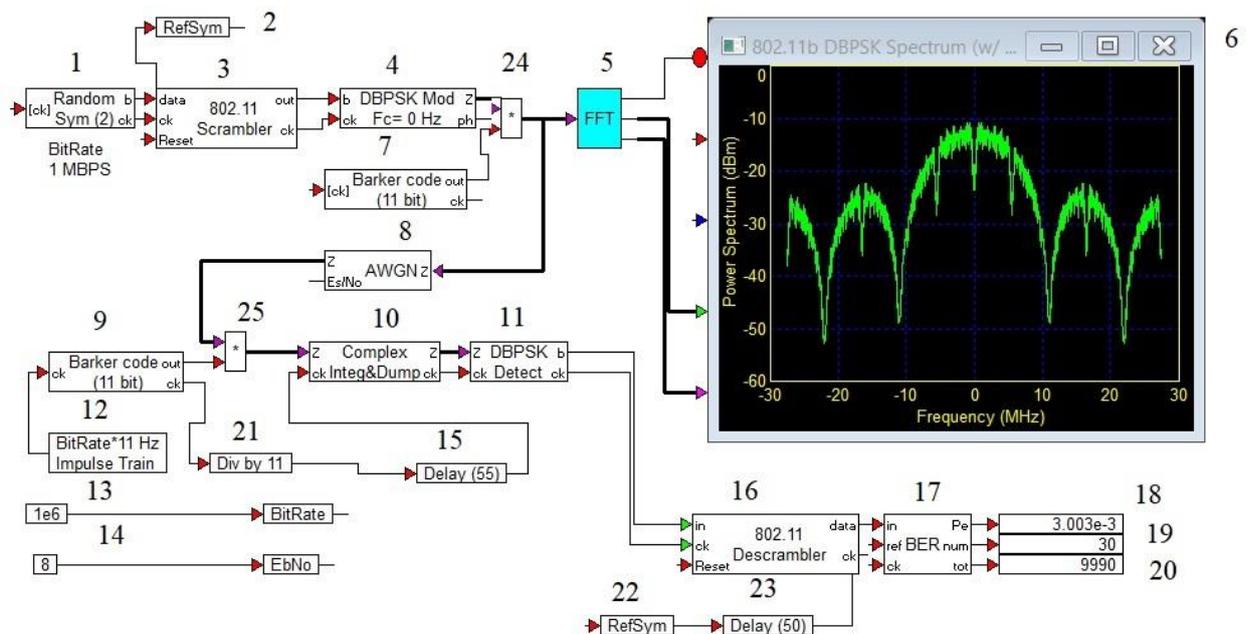


Рис. 10.3. Лабораторная установка при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11b DBPSK

Группа измерительных приборов и устройств на рис. 10.3 представлена анализатором спектра с плоттером (6), многофункциональным плоттером BER-num, или графопостроителем (Plot), который позволяет измерять коэффициент ошибок (17), линиями задержки (15) и (23), устройство (13) позволяет изменять скорость передачи тракта, а устройство (14) необходимо для установки отношения сигнал/шум –  $E_s/N_0$ , ряда вспомогательных индикаторных устройств (18), (19), (20). С помощью прибора (6) воспроизводится форма спектра сигнала на выходе модулятора, а измерительный прибор (17) измеряет коэффициента ошибок в тракте лабораторного стенда.

## 10.2. Ход работы

1. Включить компьютер. Войти в программу VisSim 5.0 с рабочего стола компьютера.

2. В меню File выбрать опцию Open. На диске C (или другом – по указанию преподавателя) открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, Wireless, 802.11b\_ССК.vsm. Загрузить файл 802.11b\_ССК.vsm. Представленный пример позволяет изучить особенности функционирования оборудования IEEE 802.11b, которое использует технологию с модуляцией, получившую название ССК (Complementary Code Keying).

Верхний плоттер (5) IEEE 802.11b ССК Spectrum показывает полученную спектральную характеристику на выходе модулятора ССК 5.5 Mbps Modulator (устройство (3) на рис. 10.1). Нижний многофункциональный плоттер в приведенном примере называется BERnum (устройство (11) на рис. 10.1). Данное устройство позволяет измерить зависимость количества корректируемых ошибок. Этим прибором выводятся значения трех параметров: индикатор (14) – общее количество переданных символов (Total bits), индикатор (13) – количество обнаруженных ошибок (Bit Errors) и непосредственно индикатор (12) показывает значение коэффициента ошибки как отношение количество обнаруженных ошибок к общему количеству переданных символов.

Исследовать зависимость коэффициента ошибок от величины параметра  $E_s/N_0$  – отношения сигнал/шум для тракта AWGN. Для этого подвести курсор к полю AWGN и после появления значка  $\leftrightarrow$  нажать правую кнопку компьютерной мыши. При этом открывается схема настройки параметров блока AWGN. В строке Run 1 вместо символов  $E_s/N_0$  установить значение отношения сигнал/шум, равное 1 дБ. Нажать кнопку ОК. Затем перейти на уровень начальной схемы (см. рис. 10.1). Для этого в левом рабочем окне экрана с помощью курсора выбрать верхнюю строчку в списке файлов и нажать левую кнопку компьютерной мыши. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера (5) IEEE 802.11b ССК Spectrum можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. С помощью

компьютерной кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. Зафиксировать значение коэффициента ошибки в отчет. Аналогичные измерения выполнить и при других значениях  $E_s/N_0$  в диапазоне значений от 1 до 10 дБ с шагом 1 дБ. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра  $E_s/N_0$ .

При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера IEEE 802.11b ССК Spectrum. Для этого подвести курсор к полю IEEE 802.11b ССК Spectrum (блок (5) на рис. 10.1) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера. На панели Options включены параметры со следующими выбранными значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы), X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии). Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – 0, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – –60, X Upper Bound (верхняя граница по X) – 30, X Lower Bound (нижняя граница по X) – –30, Time Scaling (масштаб времени) – None (нет), Sub Plot Count (указатель количества дополнительных рабочих областей) – 1. Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому они здесь подробно не рассмотрены. Для получения более детального изображения спектра можно произвести изменение указанных выше параметров, подбирая их под тот участок спектра, где необходима детализация. В частности, в программе по оси X фиксируются и отрицательные значения частоты, которые в реальных приборах, связанных с измерением спектра, отсутствуют. При необходимости можно выполнить стирание полученного изображения. Для этого необходимо снова войти в Plot Properties и на панели Options нажать кнопку Clear Overplot.

3. Исследовать зависимость формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений параметров тракта. Для этого подвести курсор к

полю блока (20), который устанавливает скорость цифрового потока Bit Rate (см. рис. 10.1) и после появления значка  нажать правую кнопку компьютерной мыши. Далее открывается окно настройки этого блока. Установить значение скорости цифрового потока, равное 10 Мбит/с. Нажать кнопку ОК. Затем перейти на уровень начальной схемы. Для этого в левом рабочем окне экрана с помощью курсора выбрать верхнюю строчку в списке файлов и нажать левую кнопку компьютерной мыши. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера (5) можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера. Для этого подвести курсор к полю IEEE 802.11b CCK Spectrum и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера и произвести необходимые изменения по методике, которая была описана выше. С помощью компьютерной кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. Зафиксировать значение коэффициента ошибки в отчет. Аналогичные измерения выполнить и при других значениях скорости цифрового потока в диапазоне значений от 5,5 до 25 Мбит/с с шагом 5 Мбит/с. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра амплитуды сигнала. Занести данные в отчет, сделать выводы.

4. Исследовать зависимость формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений параметра «Отношение сигнал/шум» для оборудования IEEE 802.11b DBPSK (см. рис. 10.3). В меню File выбрать опцию Open. На диске C (или другом – по указанию преподавателя) открыть последовательно папки VisSim 5.0, Comm Examples, Wireless, IEEE 802.11b\_DBPSK.vsm. Загру-

зитель файл 802.11b\_DBPSK.vsm. Представленный пример позволяет изучить особенности функционирования оборудования IEEE 802.11b, использующего дифференциальную бинарнофазовую манипуляцию (DBPSK) и коды Баркера.

Верхний плоттер (6) 802.11b\_DBPSK Spectrum показывает полученную спектральную характеристику на выходе модулятора DBPSK Mod (устройство (4) на рис. 10.3). Нижний многофункциональный плоттер в приведенном примере называется BERnum (устройство (17) на рис. 10.3). Данное устройство позволяет измерить зависимость количества корректируемых ошибок. Этим прибором выводятся значения трех параметров: индикатор (20) – общее количество переданных символов (Total bits), индикатор (19) – количество обнаруженных ошибок (Bit Errors) и непосредственно индикатор (18) показывает значение коэффициента ошибки как отношение количество обнаруженных ошибок к общему количеству переданных символов.

Исследовать зависимость коэффициента ошибок от величины параметра  $E_s/N_0$  – отношения сигнал/шум для тракта AWGN. Для этого подвести курсор к полю AWGN (рис. 10.3) и после появления значка  $\leftrightarrow$  нажать правую кнопку компьютерной мыши. При этом открывается схема настройки параметров блока AWGN. В строке Run 1 вместо символов  $E_s/N_0$  установить значение отношения сигнал/шум, равное 1 дБ. Нажать кнопку ОК. Затем перейти на уровень начальной схемы (см. рис. 10.3). Для этого в левом рабочем окне экрана с помощью курсора выбрать верхнюю строчку в списке файлов и нажать левую кнопку компьютерной мыши. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера плоттер (6) IEEE 802.11b\_DBPSK Spectrum можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. С помощью компьютерной кнопки PriSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. Зафиксировать значение коэффициента ошибки в отчет. Аналогичные измерения выполнить и при

других значениях  $E_s/N_0$  в диапазоне значений от 1 до 10 дБ с шагом 1 дБ. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра  $E_s/N_0$ .

При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера 802.11b\_DBPSK Spectrum. Для этого подвести курсор к полю 802.11b\_DBPSK Spectrum (блок (б) на рис. 10.3) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера. На панели Options включены параметры со следующими выбранными значениями: Fixed Bounds (фиксированные границы), X axis – 1 (количество осей X), Line Type (тип линии) – line (представление результатов с помощью линии), Grid Lines (включены сеточные промежуточные линии). Для панели Axis установлены следующие параметры: Y Upper Bound (верхняя граница по Y) – 0, Y Lower Bound (нижняя граница по Y) – –60, X Upper Bound (верхняя граница по X) – 30, X Lower Bound (нижняя граница по X) – –30, Time Scaling (масштаб времени) – None (нет), Sub Plot Count (указатель количества дополнительных рабочих областей) – 1. Панели Labels, Appearance, Traces можно использовать для оформления результатов измерений, поэтому они здесь подробно не рассмотрены. Для получения более детального изображения спектра можно произвести изменение указанных выше параметров, подбирая их под тот участок спектра, где необходима детализация. В частности, в программе по оси X фиксируются и отрицательные значения частоты, которые в реальных приборах, связанных с измерением спектра, отсутствуют. При необходимости можно выполнить стирание полученного изображения. Для этого необходимо снова войти в Plot Properties и на панели Options нажать кнопку Clear Overplot. Занести данные в отчет, сделать выводы.

5. Исследовать зависимость формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений скорости передачи – параметра BitRate. Для этого подвести курсор к полю блока BitRate (см. рис. 10.3) и после появления значка  нажать правую кнопку компьютерной мыши, открывается окно const

Properties. В нем открыть окно value, набрать значение скорости передачи, равное  $1E + 06$ , т. е. значение скорости передачи, равное  $1 \cdot 10^6$  бит/с = 1 Мбит/с. Нажать кнопку ОК. Запустить программу. Для этого нажать кнопку ПУСК, расположенную в верхнем ряду функциональных кнопок, или нажать на клавиатуре клавишу F5. После завершения переходных процессов на экране плоттера можно будет наблюдать изображение спектра, а на приборе BERnum будут отображаться данные о коэффициенте ошибки. С помощью компьютерной кнопки PrtSc скопировать полученное изображение спектра и схему лабораторной установки в отчет. При необходимости можно выполнить изменение настройки параметров плоттера. Для этого подвести курсор к полю (блок (13) на рис. 10.3) и после появления значка  нажать правую кнопку мыши. Это позволяет проверить настройки (Plot Properties) данного плоттера и произвести необходимые изменения по методике, которая была описана выше. Аналогичные измерения выполнить при значениях скорости передачи в диапазоне от 2 до 12 Мбит/с с шагом 2 Мбит/с. На основе полученных данных в отчете о практическом занятии построить и проанализировать зависимость коэффициента ошибки от величины параметра скорости передачи.

6. В меню File выбрать команду Close. Сделать выводы. Выйти из программы, выключить компьютер.

### **10.3. Содержание отчета**

1. Назначение, технические характеристики и структурные схемы исследованных блоков.
2. Полученные графические зависимости.
3. Выводы по проделанной работе.

#### 10.4. Контрольные вопросы

1. Опишите особенности исследования основных характеристик оборудования стандарта IEEE 802.11b\_ССК.
2. Опишите особенности модуляции DBPSK.
3. Опишите особенности модуляции ССК.
4. Опишите лабораторный макет при исследовании функционирования оборудования стандарта IEEE 802.11b\_DBPSK.
5. Опишите исследования зависимости формы спектра, коэффициента ошибок и других параметров от значений параметра отношения сигнал/шум для оборудования IEEE 802.11b DBPSK.

## Практическая работа № 11

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ATOLL ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОТОВЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

**Цель работы:** изучить особенности функционирования программного комплекса ATOLL.

#### 11.1. Особенности функционирования программного комплекса ATOLL при выполнении процедур проектирования сотовых сетей связи

Открыть программу ATOLL через кнопку на рабочем столе персонального компьютера.

В рабочем окне программы выбрать и нажать кнопку New (находится под кнопкой File в левом верхнем углу) (рис. 11.1).

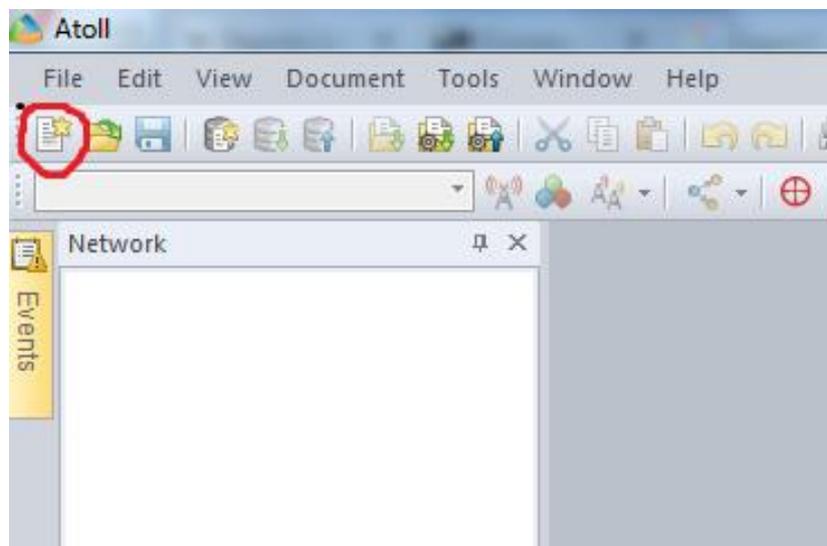


Рис. 11.1. Панель рабочей области программы ATOLL

В появившемся окне Project Templates выбрать опцию 3GPP Multi-RAT и нажать кнопку ОК (рис. 11.2). В окне 3GPP Multi-RAT проверить выбор стандарта или стандартов нескольких поколений, в которых планируется дальнейшая

работа, и нажать кнопку ОК. Эти пункты также связаны с последующей расстановкой базовых станций, что будет описано ниже.

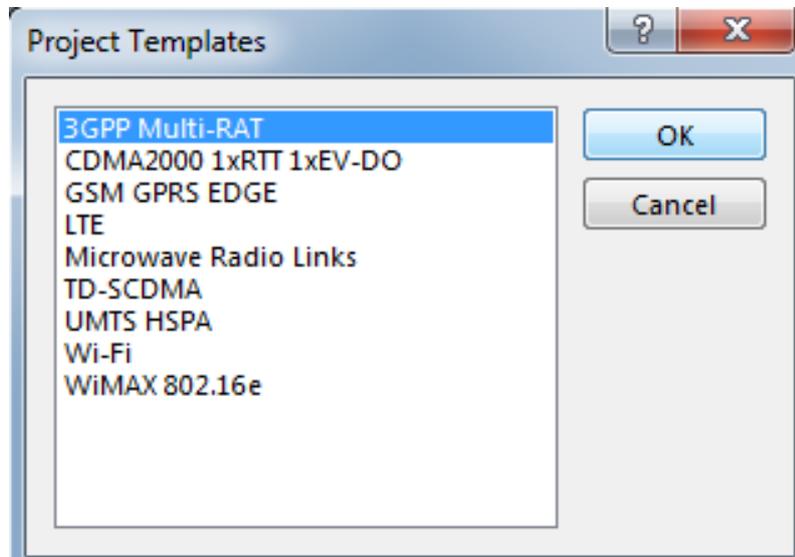


Рис. 11.2. Панель рабочей области при выборе окна Project Templates

Для подключения карт необходимо нажать File, затем Import и выбрать из папки AtollGeoData город, указанный преподавателем, например, Zhlobin (Жлобин). Далее выбирается для заданного города папка vector data, из которой выбирается index.txt, нажимается кнопка ОТКРЫТЬ. Появляется окно Data Type, из которого выбирается строка Vectors и нажимается кнопка ОК (рис. 11.3). В появившемся окне Vector Import нажать кнопку Import, т. е. импортировать карту местности. При необходимости формирования иного масштаба изображения используются инструменты «Линза +» или «Линза -», расположенные в верхней части рабочей области программы. При выборе этого инструмента и нажатии левой или правой клавишей компьютерной мыши происходит соответственно увеличение или уменьшение изображения карты населенного пункта. Для установки необходимого положения изображения на рабочем поле можно использовать рабочие инструменты программы, расположенные в верхней части и обозначенные символами «Стрелка» и «Рука». После завершения данной операции на экране

рабочей области компьютера должна появиться карта местности выбранного города, удобная для проведения следующих этапов.

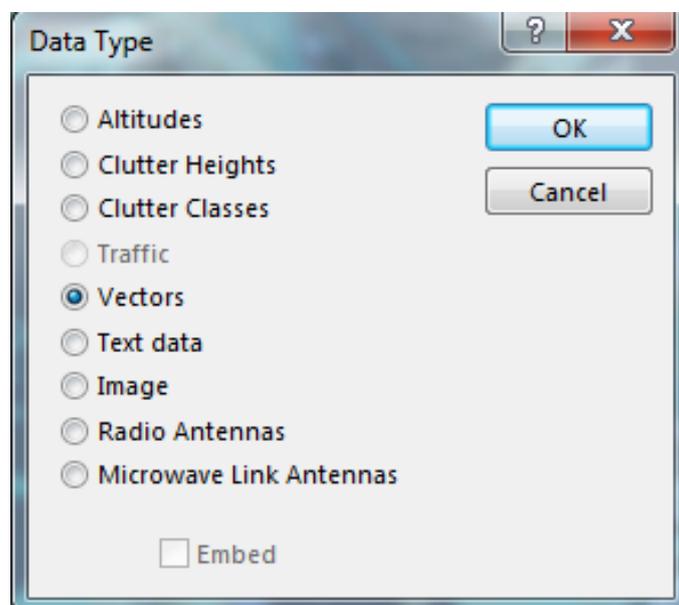


Рис. 11.3. Панель рабочей области для импортирования карты местности

Затем снова выполнить операции File → Import. Из папки Zhlobin открывается папка clutter, выбирается clutter classes → ОК (рис. 11.3). Затем снова операции File → Import. Из папки Zhlobin выбирается папка heights, затем выбирается опция index.txt, далее выбирается altitudes → ОК. При выборе altitudes становится доступной Digital Terrain Model, которая отображает особенности рельефа данной местности. Эту модель при необходимости можно отключить, убрав галочку во вкладке Geo (рис. 11.4).

Можно выбрать другой вариант создания рисунка, используя папку clutter classes. Тогда возникает необходимость корректировки цветового фона рисунка, иначе вся карта будет залита красным цветом.

При этом необходимо нажать правой кнопкой мыши на вкладке в Geo: Clutter Heights → Properties → Display type, выбрать в ниспадающем меню Discrete Values, нажать два раза на цветной прямоугольник (рис. 11.5) и выбрать белый цвет в качестве фона (для замены красного цвета) и нажать ОК.

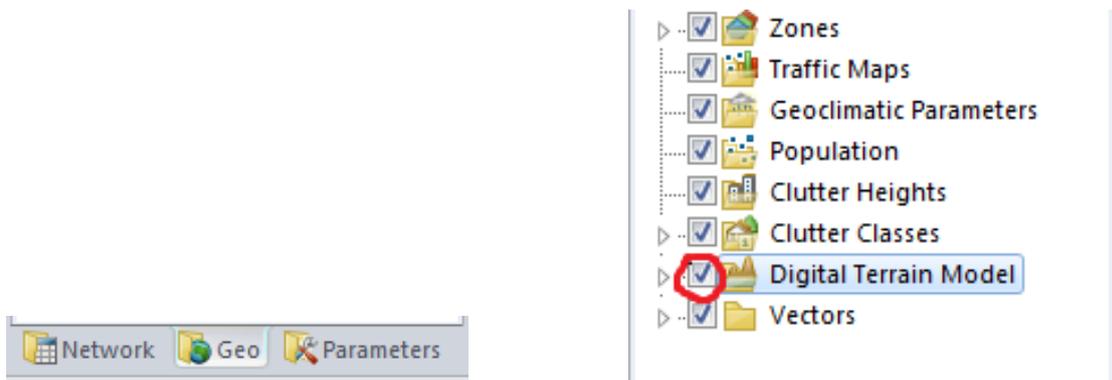


Рис. 11.4. Панель рабочей области для отключения изображения особенности рельефа данной местности

После этих операций можно считать, что карта подключена. Сохранить полученное изображение карты местности в одной из рабочих папок на компьютере по указанию преподавателя в качестве резервной копии при необходимости восстановления исходных данных.

Следующий этап заключается в расстановке базовых станций на территории выбранного района. Напомним, что при создании нового документа следует выбирать опцию 3GPP Multi-RAT.

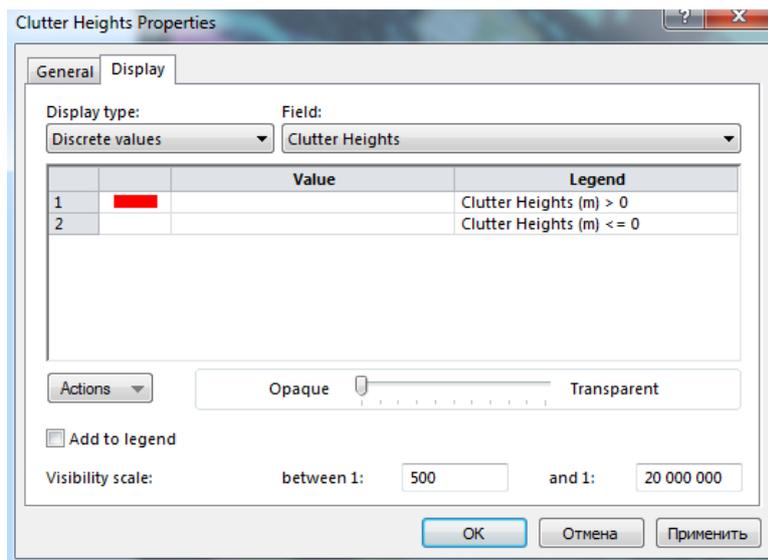


Рис. 11.5. Панель рабочей области для выбора цвета фона

На панели слева сверху выбрать тип базовой станции стандартов UMTS, GSM, LTE (рис. 11.6).

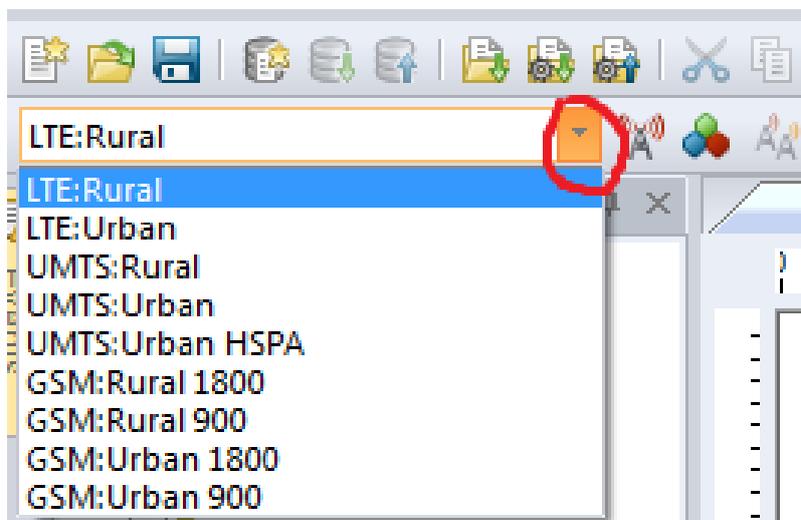


Рис. 11.6. Панель рабочей области для выбора типа базовой станции

Для добавления базовых станций на карту необходимо нажать левой клавишей на значок базовой станции в панели (рис. 11.7).



Рис. 11.7. Панель рабочей области для добавления базовых станций на карту

Далее подвести курсор к точке предполагаемого размещения на созданной карте местности и снова нажать левую клавишу мыши. Таким образом будет выполнено размещение одной базовой станции, которая получает название Site0. Двойным нажатием на левую клавишу мыши открыть окно Site0\_Properties. При необходимости можно в поле Name изменить название базовой станции на другое.

Если необходимо установить базовую станцию в другое место, то эта базовая станция удаляется операцией Delete и новая станция устанавливается в нужную точку.

Далее осуществляется настройка каждого сайта базовой станции. Предположим, что осуществляется настройка базовой станции стандарта LTE. Во вкладке Network выбрать опцию LTE Transmitters. На основном рабочем поле появляется таблица с параметрами передатчика, которые можно изменять, устанавливая необходимые соответствующие значения. Можно изменять параметры через опцию СВОЙСТВА (Properties) (третья слева кнопка). При нажатии этой кнопки появляется новое окно настройки Site0\_LTE1\_Properties, которое во вкладке Transmitter (передатчик) имеет вид, показанный на рис. 11.8. Для рассмотренного примера установлены следующие значения оборудования: высота антенны – 35 метров, потери 0,5 дБ, модель антенны – 1800 МГц, 65° охвата, усиление – 17 дБи, азимут – 225 градусов. Другие параметры оборудования указаны в таблице на рис. 11.8. При выполнении контрольной работы в соответствии с номером варианта устанавливаются новые значения части параметров.

Transmission		Reception	
Real	Calculated	Real	Calculated
0.5 dB	0 dB	0.5 dB	0 dB

Antennas	
Height/ground:	35 m
Main Antenna Model:	1800MHz 65deg 17dBi 2Tilt
Mechanical azimuth:	225 °
Mechanical downtilt:	0 °

Number of antenna ports	
Transmission:	2
Reception:	2

Рис. 11.8. Вкладка Transmitter с настройками параметров сайта базовой станции

В этом же окне во вкладке Cells установили следующие значения (рис. 11.9). В качестве частотного диапазона был выбран Band 3, который предполагает использование частоты 1800 МГц с шириной канала 20 МГц. Мощность базовой станции составляет 43 дБм.

Frequency Band	E-UTRA Band 3 - 20MHz	ICIC Configuration	
Channel Number	1 300	TDD Frame Configuration	0 - DSUUU-DSUUU
Channel Allocation Status	Not Allocated	Reception Equipment	Default Cell Equipment
Physical Cell ID	0	Scheduler	Proportional Fair
PSS ID	0	Diversity Support (DL)	AMS
SSS ID	0	Diversity Support (UL)	AMS
Physical Cell ID Status	Not Allocated	Traffic Load (DL) (%)	100
Reuse distance (m)		ICIC Ratio (DL) (%)	0
Max Power (dBm)	43	Traffic Load (UL) (%)	100
RS EPRE (dBm)	12,4	UL Noise Rise (dB)	0
SS EPRE Offset / RS (dB)	0	Angular distributions of interference (AAS)	
PBCH EPRE Offset / RS (dB)	0	AAS Usage (DL) (%)	0
PDCCH EPRE Offset / RS (dB)	0	ICIC UL Noise Rise (dB)	0
PDSCH EPRE Offset / RS (dB)	0	MU-MIMO Capacity Gain (UL)	2
Instantaneous RS Power (dBm)	35,4	Inter-technology DL Noise Rise (dB)	0
Instantaneous SS Power (dBm)	31	Inter-technology UL Noise Rise (dB)	0
Instantaneous PBCH Power (dBm)	31	Number of Users (DL)	30
Average PDCCH Power (dBm)	42,4	Number of Users (UL)	30
Average PDSCH Power (dBm)	42,8	Max Traffic Load (DL) (%)	100
Min RSRP (dBm)	-140	Max Traffic Load (UL) (%)	100
AMS & MU-MIMO Threshold (dB)		Max Number of Users	240
ICIC Delta Path Loss Threshold (dB)	0	Max number of intra-technology neighbours	16
Fractional Power Control Factor	1	Max number of inter-technology neighbours	16
Max UL Noise Rise (dB)	6	Comments	
Max PUSCH C/(I+N) (dB)	20	Physical Cell ID Domain	
Interference Coordination Support		Neighbours	...

Рис. 11.9. Вкладка Cells с настройками параметров сайта базовой станции

Максимальное количество пользователей, которое может вместить один сайт, – 240. Также в качестве параметра Diversity Support был выбран AMS. Он подразумевает под собой, что антенна автоматически может менять это значение с SU-MIMO на MU-MIMO. Другие параметры оборудования указаны в таблице на рис. 11.9. Аналогично производится расстановка и выбор параметров других сайтов для выбранного города по карте местности. Для примера на рис. 11.10 показано размещение базовых станций для города Жлобина.

На следующем шаге выбирается модель расчета потерь радиосигнала в свободном пространстве – от базовой станции к абоненту и обратно. Во вкладке Propagation выбираем Propagation model и далее задаем модель, которая будет применяться в расчетах, например, выбираем модель Cost-Hata (рис. 10.11).

Также с помощью этой вкладки задаются параметры расчета – радиус и разрешение (Radius, Resolution).

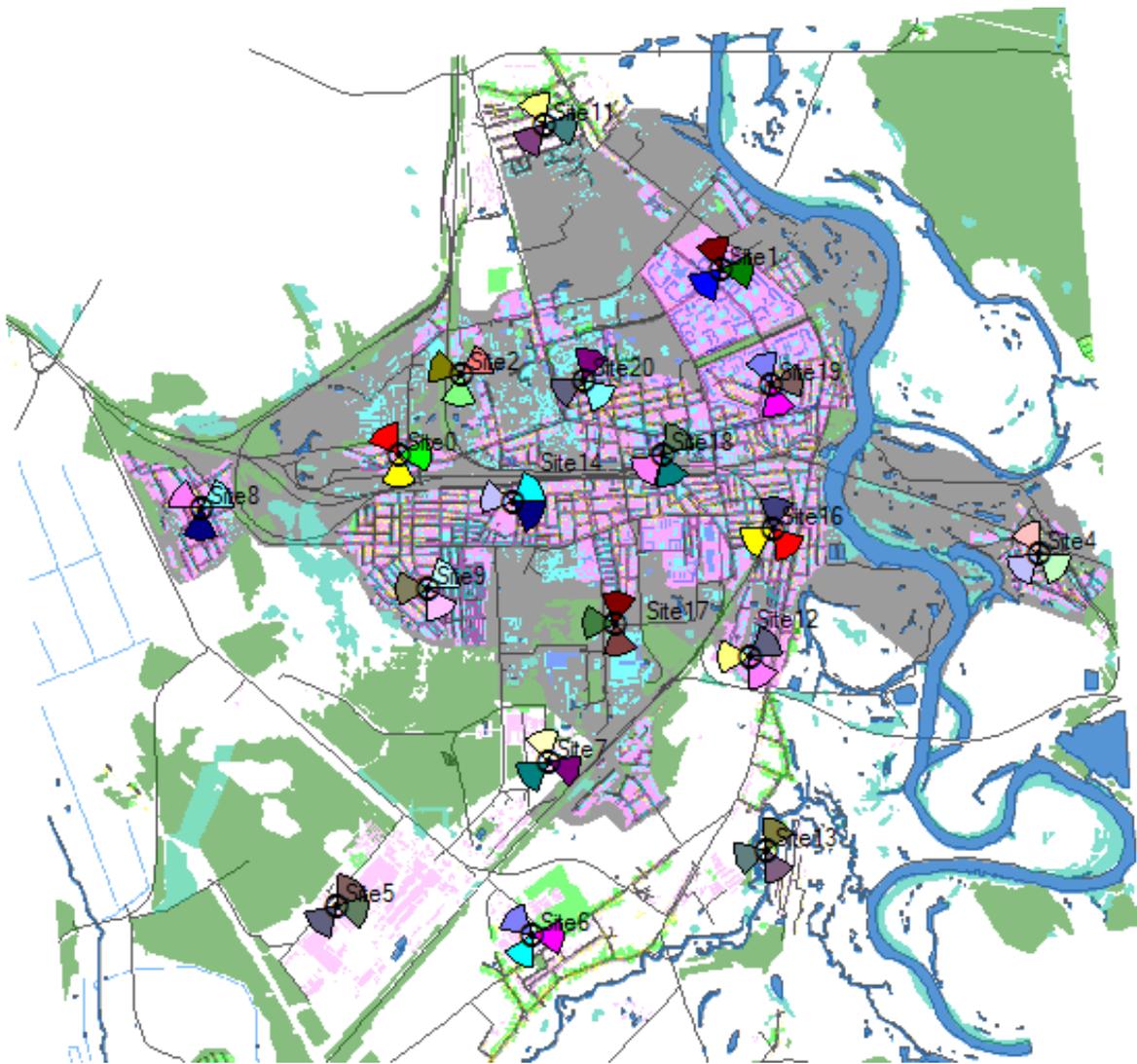


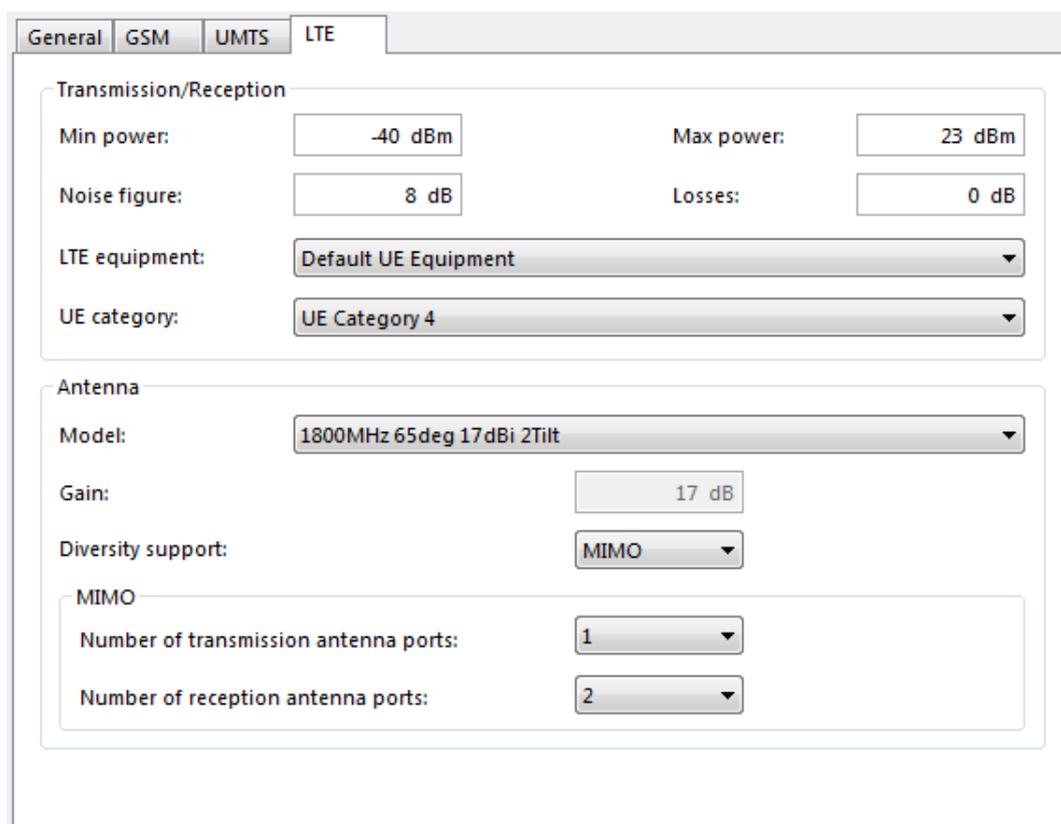
Рис. 11.10. Карта города Жлобина с расставленными базовыми станциями eNB

Main matrix	Extended matrix
Propagation model:	Propagation model:
Cost-Hata	(none)
Radius: 5 000 m	Radius: m
Resolution: 20 m	Resolution: m

Рис. 11.11. Окно программного комплекса Atoll с настройками параметров сайта базовой станции (вкладка Propagation model)

При необходимости для раскраски секторов базовой станции можно воспользоваться опцией СВОЙСТВА (Properties) и выбрать соответствующий цвет вместо черного, установленного по умолчанию.

В качестве пользовательского оборудования во вкладке Parameters → Traffic Parameters → Terminals выбираем LTE оборудование → LTE MIMO Terminals. Было выбрано UE четвертой категории с параметрами Noise figure – 8 dB (дБ), MIMO 1 × 2 и др. (рис. 11.12). Это означает, что используются LTE-телефоны 4-й категории, для которых максимальная скорость «вниз» составляет 150 Мбит/с, «вверх» – 50 Мбит/с. Остальные параметры имеют следующие значения: минимальный уровень сигнала –40 дБм, максимальный уровень +23 дБм в диапазоне частот 1800 МГц, секторизация антенн – 65°, коэффициент усиления – 17 дБ. Параметры MIMO антенн: MIMO 2 × 2 от базовой станции к пользователю и 1 × 2 в обратном направлении.



Section	Parameter	Value
Transmission/Reception	Min power:	-40 dBm
	Max power:	23 dBm
	Noise figure:	8 dB
	Losses:	0 dB
	LTE equipment:	Default UE Equipment
	UE category:	UE Category 4
Antenna	Model:	1800MHz 65deg 17dBi 2Tilt
	Gain:	17 dB
	Diversity support:	MIMO
	MIMO	
	Number of transmission antenna ports:	1
Number of reception antenna ports:	2	

Рис. 11.12. Окно программного комплекса Atoll с настройками параметров абонентского оборудования

Завершающим этапом является этап проведения расчетов для выбранного количества базовых станций и параметров оборудования. С помощью программы можно рассчитать пропускную способность, покрытие города передатчиками, анализ эффективного сигнала, уровень сигнала на покрытой территории, уровень сигнал/шум и другие характеристики. Для выполнения расчетов параметров созданной сети LTE необходимо войти на вкладку Network (рис. 11.13).



Рис. 11.13. Панель рабочей области программы ATOLL при начале выполнения расчетов

Если ее нет на панели слева внизу, ее можно найти сверху во вкладке View (рис. 11.14). Затем в раскрывшемся окне Network выбрать правой кнопкой мыши Predictions, затем – New prediction (рис. 11.15). Появляется окно Prediction Types, выбрать Standard Predictions LTE, нажать на плюс. Выбрать вид рассчитываемого типа покрытия (к примеру, Coverage by Transmitter) и нажать ОК. Появляется окно LTE: Coverage by Transmitter 0 Properties, нажать ОК. Перейти ко вкладке Network, подвести курсор к надписи Predictions, правой клавишей выбрать опцию Calculate. После окончания процесса моделирования на карте вблизи данной базовой станции появляется изображение зон покрытия передатчиков трех секторов.

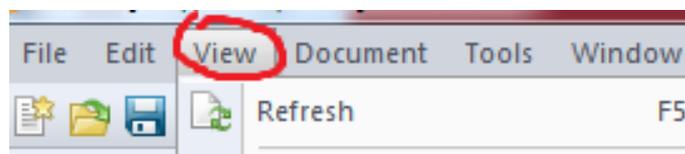


Рис. 11.14. Панель рабочей области программы ATOLL с вкладкой View

При получении многоцветных зон покрытия (например, Coverage by Signal Level 0 Properties) подвести курсор к графической области и нажать два раза на левую клавишу мыши.

Выбрать вкладку Display, которая поясняет привязку цвет к уровню мощности сигнала. Должна быть выбрана опция Value intervals в поле Display type.

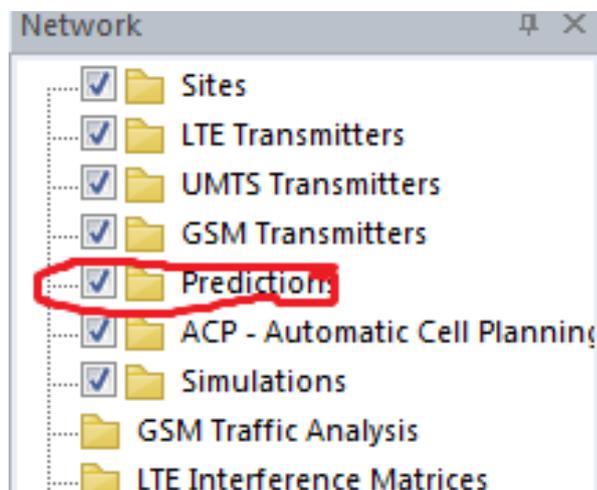


Рис. 11.15. Панель рабочей области для выбора режима Predictions

Далее выбрать необходимые действия и нажать кнопку ОК. Затем или раскрыть список Predictions и нажать правой кнопкой мыши на Prediction, который нужно рассчитать, затем на Calculate (рис. 11.16), или нажать на значок на верхней панели (рис. 11.17).

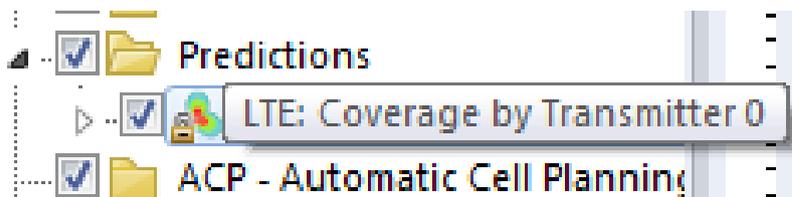


Рис. 11.16. Панель рабочей области с командой Calculate из папки Predictions



Рис. 11.17. Панель рабочей области для запуска команды Calculate

В результате получаем карты покрытия города Жлобина с рассчитанным уровнем сигнала покрытой территории, показанные на рис. 11.18 и 11.19.

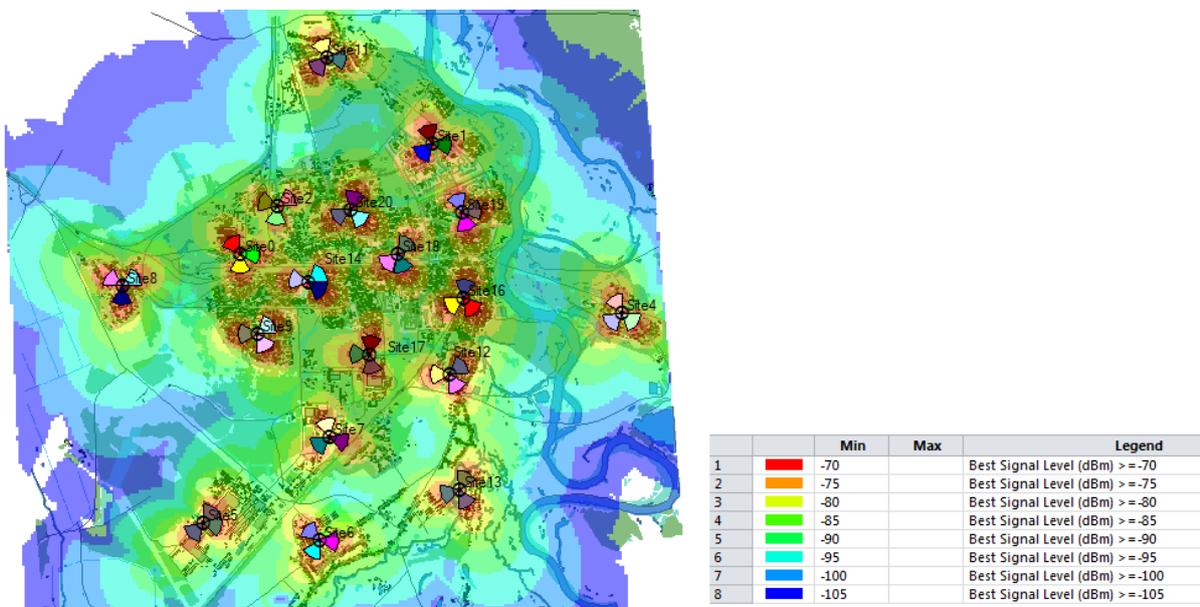


Рис. 11.18. Карта города Жлобина с рассчитанным уровнем сигнала покрываемой территории

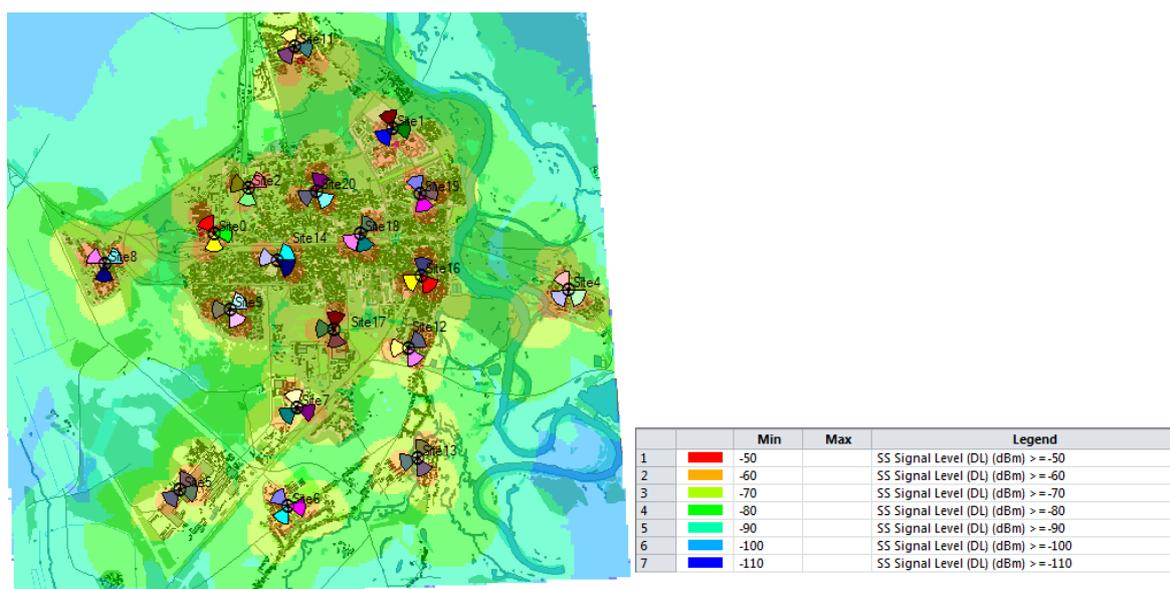


Рис. 11.19. Карта города Жлобина с анализом эффективного сигнала на линии «ВНИЗ»

Анализ полученных результатов проектирования сети сотовой связи для города Жлобина показывает, что с использованием 20 базовых станций удастся организовать эффективное покрытие центральной части города с уровнем сигнала, который достаточен для работы абонентских сотовых терминалов с заданными параметрами чувствительности.

## Практическая работа № 12

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ПОКРЫТИЯ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ

**Цель работы:** изучить особенности моделирования с использованием программного комплекса ATOLL.

#### 12.1. Исходные данные и общие указания для проведения моделирования

Индивидуальное моделирование с использованием программного комплекса Atoll выполняется в последовательности, описанной в практической работе № 11, в соответствии с номером варианта, который состоит из пяти цифр. Например, номер варианта такой: 10341. В процессе выполнения моделирования в соответствии с номером варианта выбирают исходные данные, представленные в табл. 12.1–12.6. Выполняется проектирование сети покрытия базовых станций для одного из городов Республики Беларусь. В отчете должны быть представлены данные о выбранном оборудовании базовых станций и терминального оборудования из табл. 12.2–12.4. Основным результатом проектирования являются карты зон покрытия для города, выбранного из табл. 12.1. Данные табл. 12.1 и 12.6 являются общими для всех стандартов. Данные табл. 12.2, 12.4 используются для сетей стандарта GSM. Данные табл. 12.3, 12.5 используются для сетей стандарта UMTS и LTE. Остальные параметры базовых станций и абонентского оборудования, не представленные в табл. 12.2–12.4, выбираются студентами самостоятельно из тех вариантов, которые предлагает программа и которые соответствуют тому стандарту, который задается в табл. 12.1.

Исходные данные сотовой сети связи

Первая и вторая цифры номера варианта	Стандарт	Город	Количество базовых станций
01	GSM	Барановичи	5
02	UMTS	Бобруйск	4
03	LTE	Борисов	6
04	GSM	Лида	4
05	LTE	Молодечно	5
06	UMTS	Мозырь	4
07	GSM	Новополоцк	5
08	UMTS	Осиповичи	6
09	LTE	Пинск	4
10	GSM	Полоцк	6
11	UMTS	Речица	5
12	LTE	Слуцк	4
13	GSM	Солигорск	5
14	UMTS	Светлогорск	6
15	LTE	Жлобин	4
16	GSM	Жодино	5
17	UMTS	Барановичи	6
18	LTE	Мозырь	4
20	GSM	Новополоцк	6
21	UMTS	Лида	5

Таблица 12.2

Параметры оборудования базовых станций сотовой сети связи  
для стандартов GSM

Третья цифра номера варианта	Высота подвеса антенны базовой станции (Height/ ground), м	Мощность (Power), дБ	Диапазон (Main Antenna/ Model)	Общие потери, дБ
1	30	0,4	1800 MHz 30 deg 17 dBi	1
2	40	0,6	1800 MHz 65 deg 17 dBi	3,6
3	50	0,9	900 MHz 90 deg 17 dBi	2
4	35	0,7	900MHz 65 deg 17 dBi	4
5	25	1,1	1800 MHz 65 deg 17 dBi	5

Таблица 12.3

Параметры оборудования базовых станций сотовой сети связи  
для стандартов UMTS, LTE

Третья цифра номера варианта	Высота подвеса антенны базовой станции (Height/ ground), м	Общие потери при передаче (приеме), дБ	Диапазон (Main Antenna/Model)
1	30	0,4	2100 MHz 120 deg 14,5 dBi
2	40	0,6	1800 MHz 65 deg 17 dBi
3	50	0,9	2100 MHz 65 deg 6 dBi
4	35	0,7	1800MHz 65 deg 17 dBi
5	25	1,1	2100 MHz 65 deg 6 dBi

Таблица 12.4

Параметры оборудования абонентов сотовой сети связи для стандартов GSM

Четвертая цифра номера варианта	Основной диапазон (Main band), м	Коэффициент шума (Noise figure), дБ	Технология (Technology)
1	Соответствует диапазону БС	9,6	GSM
2	Соответствует диапазону БС	10	GSM/GPRS
3	Соответствует диапазону БС	9,5	GPRS
4	Соответствует диапазону БС	9,2	GSM
5	Соответствует диапазону БС	9,9	GSM/GPRS

Таблица 12.5

Параметры оборудования абонентов сотовой сети связи для стандартов UMTS, LTE

Четвертая цифра номера варианта	Максимальная мощность (Max Power), дБм	Минимальная мощность (Min Power), дБм	Коэффициент шума (Noise figure), дБ	Потери (Losses), дБ
1	20	-60	8,6	1,8
2	25	-70	9	2,4
3	15	-80	9,2	1,5
4	5	-75	9,3	2,8
5	12	-85	9,9	3,2

Параметры моделирования сотовой сети связи

Пятая цифра номера варианта	Модель предсказания	Радиус (Radius), м	Разрешение (Resolution), м
1	Cost – Hata	15000	50
2	Okumura – Hata	17000	80
3	ITU15476	16000	40
4	ITU370	14000	60
5	Erceg – Greenstein	12000	70

## 12.2. Пример выполнения частотно-территориального проектирования сети сотовой связи для города Лиды

Важнейшим этапом проектирования сетей является процесс частотно-территориального планирования. В ходе этого планирования выбирается структура (конфигурация) сети, места размещения базовых станций, рассчитывается возможность обеспечения радиопокрытия с заданным качеством связи, разрабатывается частотный план распределения радиоканалов для базовых станций, выполняется адаптация плана к условиям территориальных и частотных ограничений проектируемой зоны обслуживания, формируются зоны обслуживания для каждой БС и сети в целом, оцениваются и минимизируются внутрисистемные помехи.

При планировании иногда возникает необходимость проверки внешней электромагнитной совместимости с РЭС других систем и возможность обеспечения требуемой емкости сети для обслуживания абонентской нагрузки.

Наиболее эффективным инструментом автоматизации процесса планирования сетей сотовой связи является использование геоинформационных систем (ГИС). Специальные ГИС состоят из программного и информационного компонентов. Программный компонент содержит сервисные и расчетные программы для ввода пространственных и описательных данных, их обработки и вывода ре-

зультатов. Информационный компонент, в свою очередь, содержит карту местности и объектно-ориентированную базу данных, в которой имеются сведения по всем существенным аспектам проектируемой сети сотовой связи.

Используемый программный комплекс ATOLL – это система автоматизированного проектирования сетей мобильной связи, включающая в себя программное, математическое и информационное обеспечение. Основными особенностями продукта являются:

- интуитивный и удобный интерфейс, который позволяет значительно быстрее импортировать необходимые данные в разрабатываемый проект и выполнять проектирование в более короткие сроки (рис. 12.1);

- поддержка 3GPP Multi-RAT проектов, позволяющая объединять технологии GSM/UMTS/LTE или CDMA/LTE в одном проекте;

- использование ГИС собственной разработки, оптимизированной для целей радиопланирования, позволяет увеличить скорость загрузки и отображения карт, а также импортировать векторные и растровые карты наиболее распространенных форматов (MapInfo, Arcgis, Google Earth);

- возможность рассчитать карты покрытия в масштабах города, региона или страны в рамках одного проекта, при этом не требуется подключение сторонних модулей и сшивки нескольких карт покрытия;

- точность расчетов, позволяющая с высокой достоверностью планировать сети с нуля.

Для функционирования программы ATOLL требуется большой набор исходных данных, недостоверность которых может существенно повлиять на результаты планирования. К необходимым исходным данным относятся географические данные и параметры базовых и мобильных станций, а также технические характеристики оборудования. Географические данные содержат матрицу высот рельефа местности, тип и высоту ее застройки.

Программный комплекс ATOLL использует ГИС, основанный на векторной карте формата MapInfo MapX.



Рис. 12.1. Панель рабочей области программы ATOLL с картой местности

На рис. 12.2 показано окно вкладки Geo, в котором отображены основные функции ГИС. К функциям ГИС относятся:

- просмотр карты местности;
- определение координат точки (широта, долгота);
- высота объектов над уровнем моря;
- отображение рельефа местности и др.

Конфигурация сети LTE, технические характеристики моделей антенн базовых станций, параметры и состав оборудования модели БС, характеристики приемопередающего оборудования МС и все энергетические параметры отображены во вкладке Network (рис. 12.3).

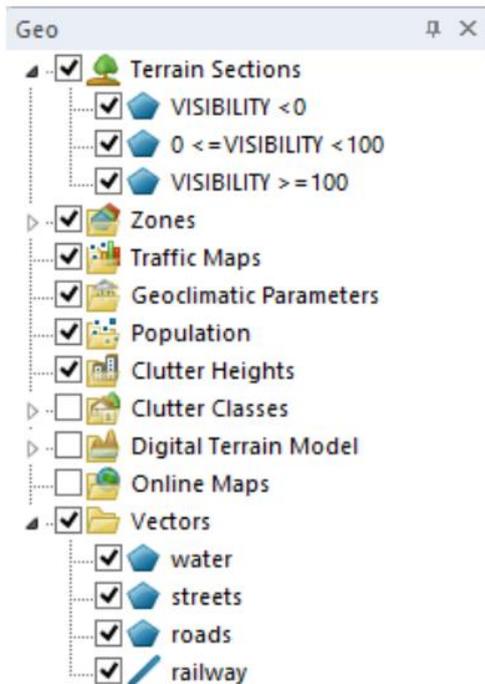


Рис. 12.2. Окно вкладки Geo

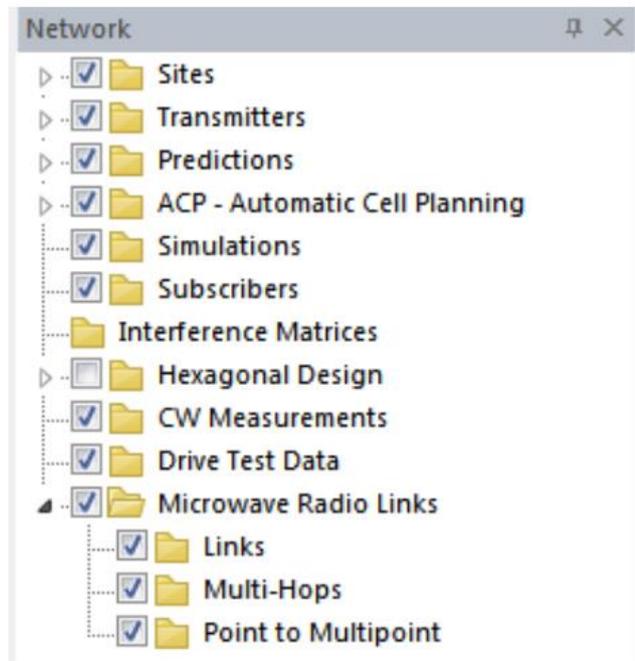


Рис. 12.3. Окно вкладки Network

В папках по каждому разделу содержатся объекты, которые моделируют характеристики сети, а также внешние условия. Объекты настроек имеют набор параметров, значения которых соответствуют характеристикам оборудования, местности, расчетным моделям и т. д. Для проектирования сети сотовой связи стандарта LTE Advanced города Лида на карте были размещены базовые станции типа LTE:Rural. При расчетах было установлено, что для обеспечения покрытия территории города и прилегающих районов необходимо разместить не менее 37 базовых станций eNB. В пределах города БС размещались на крышах девятиэтажных зданий. Дальнейшие корректировки положения БС надо проводить в соответствии с программными расчетами.

На рис. 12.4 представлен вариант расположения базовых станций в г. Лиде. После расстановки и корректировки положения базовых станций необходимо осуществить настройку каждого сектора БС. Для этого во вкладке Network выбирается опция LTE Transmitters. Во вкладке Transmitter устанавливаются следующие параметры: тип передатчика – Intra-network, потери в фидерном тракте приемника и передатчика – 0,5 дБ, модель антенны базовой станции – 2100 МГц, 65° охвата, усиление – 18 дБи, высота подвеса антенны – 50 м, угол наклона антенны – 0°. Для обеспечения работы в режиме MIMO 4 × 4 в окне Number of antenna ports устанавливаются по две антенны на прием и передачу.

На рис. 12.5 показано окно eNB\_LTE Properties. В этом же окне во вкладке Cells были установлены значения, которые представлены на рис. 12.6. В качестве частотного диапазона Frequency Band был выбран E-UTRA Band 3–20 MHz, который предполагает использование частоты 2100 МГц с шириной канала 20 МГц. Мощность передатчика базовой станции равна 40 дБм. Во вкладке Min RSRP устанавливается минимальное значение мощности принятых пилотных сигналов –140 дБм. Для снижения интерференции устанавливаем значение частичного контроля мощности Fractional Power Control Factor равное единице. Это позволит снизить уровень межсотовой интерференции, при этом абоненты на краях соты не будут испытывать проблемы, вызванные неполной компенсацией потерь сигнала во время распространения. Также в качестве параметров Diversity support (разнесенный прием для борьбы с многолучевым распространением сигналов) был выбран AMS (Adaptive MIMO Switching). AMS подразумевает, что антенна может автоматически менять значение с SU-MIMO на MU-MIMO.

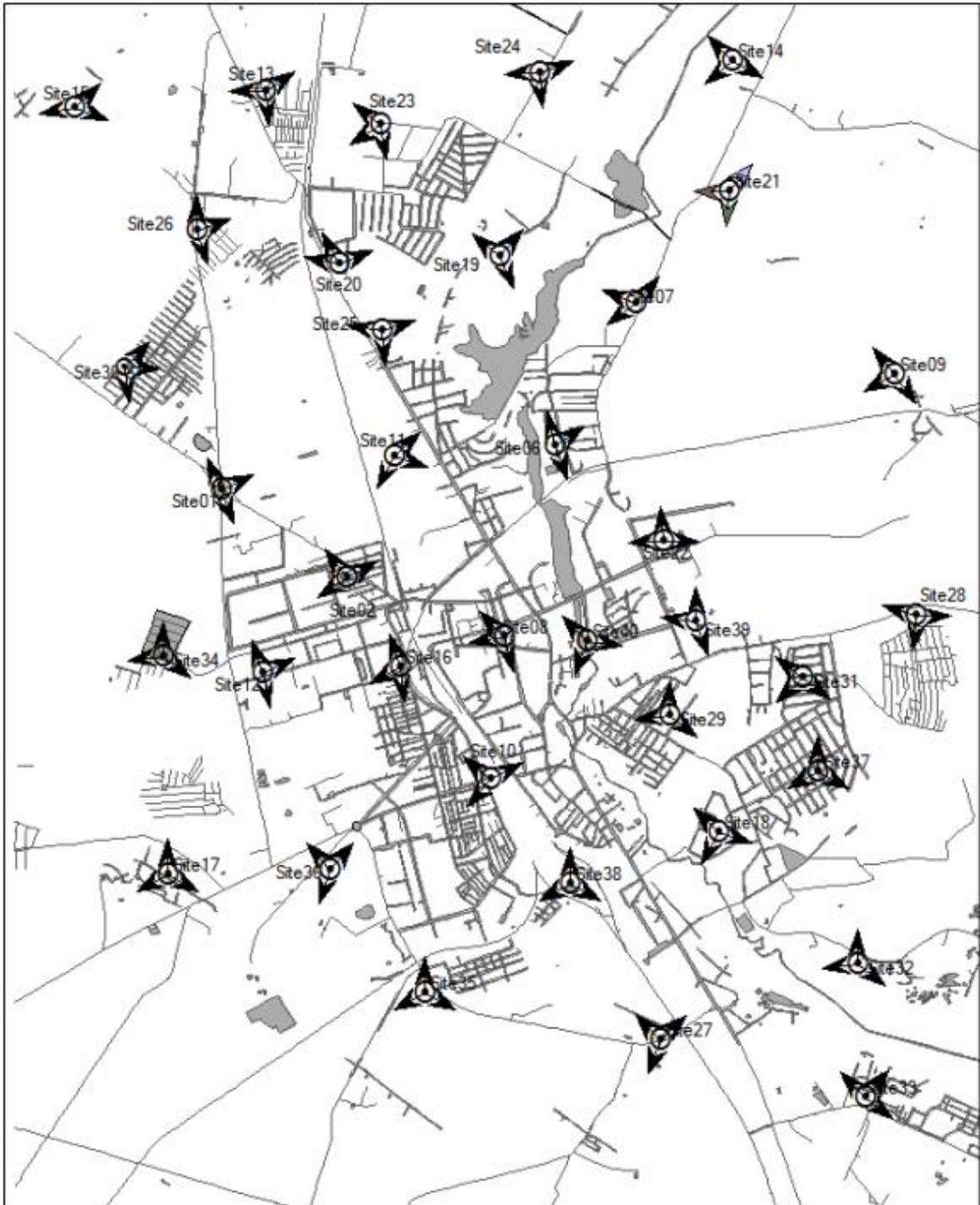


Рис. 12.4. Карта города с расставленными базовыми станциями

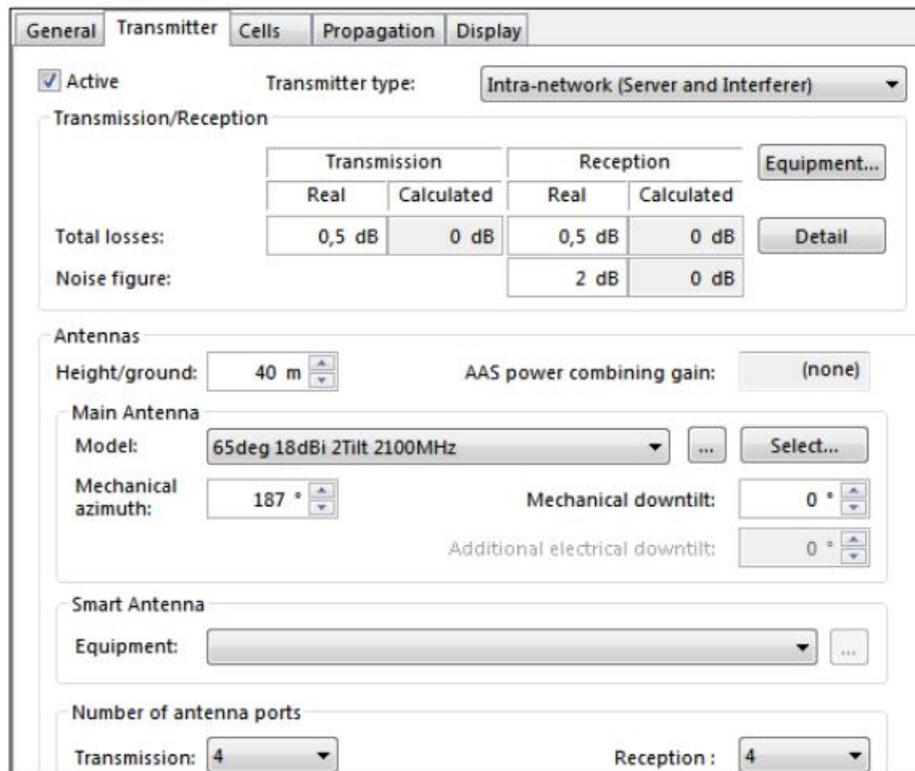


Рис. 12.5. Интерфейс настройки сайта базовой станции (вкладка Transmitter)

Frequency Band	(E-UTRA Band 1)	Channel Allocation Status	Not Allocated
SSS ID	0	Reception Equipment	Default Cell Equipment
Physical Cell ID Status	Not Allocated	Scheduler	Proportional Fair
Reuse distance (m)		Diversity Support (DL)	AMS
Max Power (dBm)	43	Diversity Support (UL)	AMS
RS EPRE (dBm)	12,7	Traffic Load (DL) (%)	100
SS EPRE Offset / RS (dB)	0	ICIC Ratio (DL) (%)	0
PBCH EPRE Offset / RS (dB)	0	Traffic Load (UL) (%)	100
PDCCH EPRE Offset / RS (dB)	0	UL Noise Rise (dB)	0
PDSCH EPRE Offset / RS (dB)	0	Angular distributions of interference (AAS)	
Instantaneous RS Power (dBm)	35,7	AAS Usage (DL) (%)	0
Instantaneous SS Power (dBm)	31,3	ICIC UL Noise Rise (dB)	0
Instantaneous PBCH Power (dBm)	31,3	MU-MIMO Capacity Gain (UL)	2
Average PDCCH Power (dBm)	41,7	Inter-technology DL Noise Rise (dB)	0
Average PDSCH Power (dBm)	43	Inter-technology UL Noise Rise (dB)	0
Min RSRP (dBm)	-140	Number of Users (DL)	1
AMF & MU-MIMO Threshold (dB)		Max Traffic Load (DL) (%)	100
ICIC Delta Path Loss Threshold (dB)	0	Max Traffic Load (UL) (%)	100
Fractional Power Control Factor	1	Max Number of Users	100
Max UL Noise Rise (dB)	6	Max number of intra-technology neighbours	16
Max PUSCH C <sub>(j+N)</sub> (dB)	20	Max number of inter-technology neighbours	16
Interference Coordination Support		Comments	
ICIC Configuration		Physical Cell ID Domain	
TDD Frame Configuration	0 - DSUUU-DSUUU		

Рис. 12.6. Интерфейс настройки сайта базовой станции (вкладка Cells)

Далее выбирается модель расчета потерь радиосигнала в свободном пространстве – от базовой станции к абоненту и обратно. Во вкладке Propagation выбирается Propagation Model и далее задается модель, которая будет применяться в расчетах (рис. 12.7).

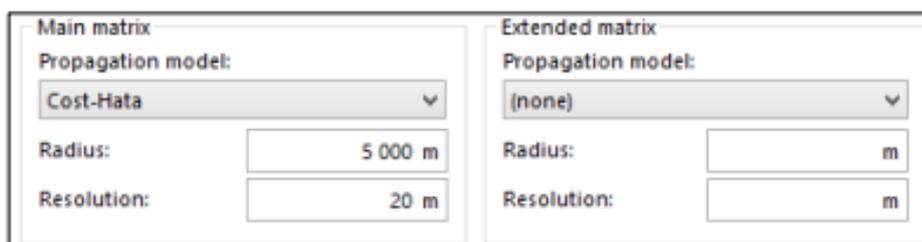


Рис. 12.7. Интерфейс настройки сайта базовой станции (вкладка Propagation)

В окне Propagation model выбирается модель Cost – Hata, а также задаются параметры расчета – радиус и разрешение (Radius, Resolution). На следующем шаге осуществляется настройка пользовательского оборудования. Для этого во вкладке Parameters → Traffic Parameters → Terminals выбираем LTE оборудование LTE MIMO Terminal (рис. 12.8). Были установлены следующие параметры моделирования: минимальный и максимальный уровень сигнала –40 и +23 дБм соответственно, коэффициент шума – 8 дБ. В качестве абонентского терминала было выбрано UE четвертой категории, максимальная скорость «вниз» составляет 150 Мбит/с, максимальная скорость «вверх» – 50 Мбит/с. Параметры MIMO антенн: 1 × 4 от пользователя к базовой станции.

Завершающим этапом является этап проведения расчетов для выбранного количества базовых станций и параметров оборудования. С помощью программы можно рассчитать пропускную способность, зоны покрытия города, которые формируются в результате работы сети передатчиков базовых станций, уровень сигнала на территории населенного пункта и другие характеристики.

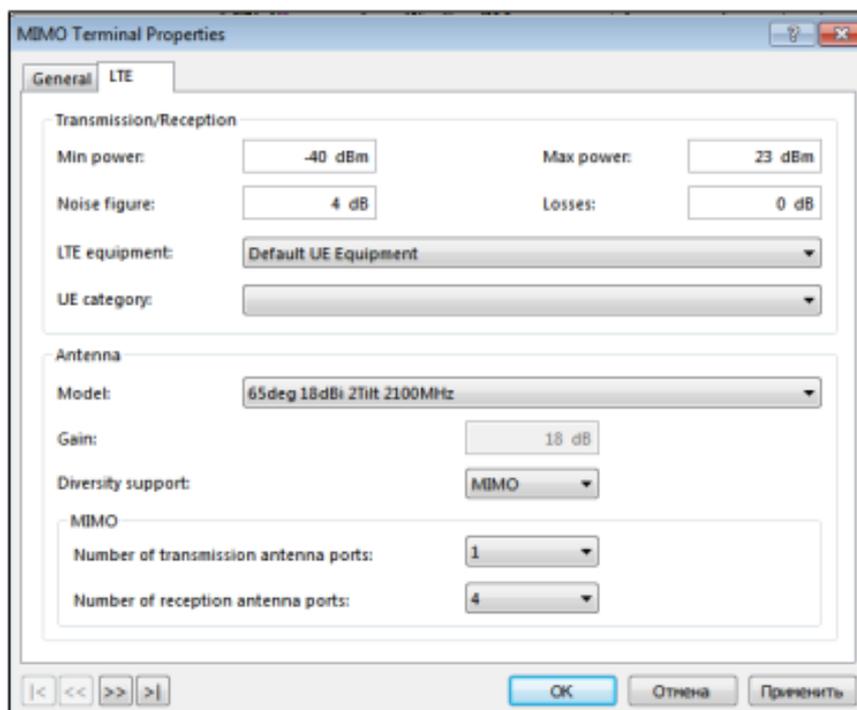


Рис. 12.8. Интерфейс настройки параметров абонентского оборудования

Для выполнения расчетов в сети LTE необходимо перейти на вкладку Network → Predictions. Затем выбирается вид рассчитываемого типа покрытия Coverage by Transmitter. После окончания процесса моделирования на карте вблизи базовых станций появляется изображение зон покрытия передатчиков трех секторов. В результате получаем карту покрытия г. Лиды с рассчитанным уровнем сигнала, показанную на рис. 12.9.

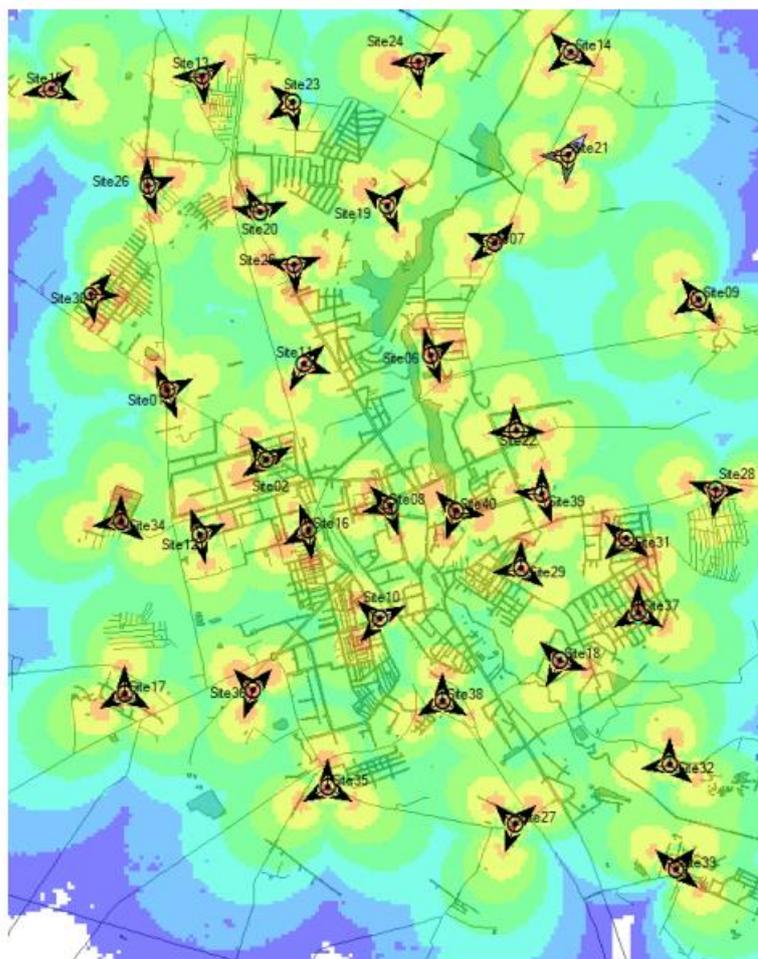


Рис. 12.9. Карта г. Лиды с рассчитанным уровнем сигнала

Анализ полученных результатов проектирования сети сотовой связи стандарта LTE для г. Лиды показывает, что с использованием 37 БС удастся организовать эффективное покрытие центральной части города с уровнем сигнала, достаточным для работы абонентских терминалов с заданными параметрами чувствительности.

Данные, связанные с моделированием скорости передачи данных в линии «вниз», представлены на рис. 12.10. Стоит отметить, что основной целью проектирования было обеспечить покрытие города, поэтому в процессе планирования допускалось незначительное ухудшение качества доступа вдали от жилых районов.

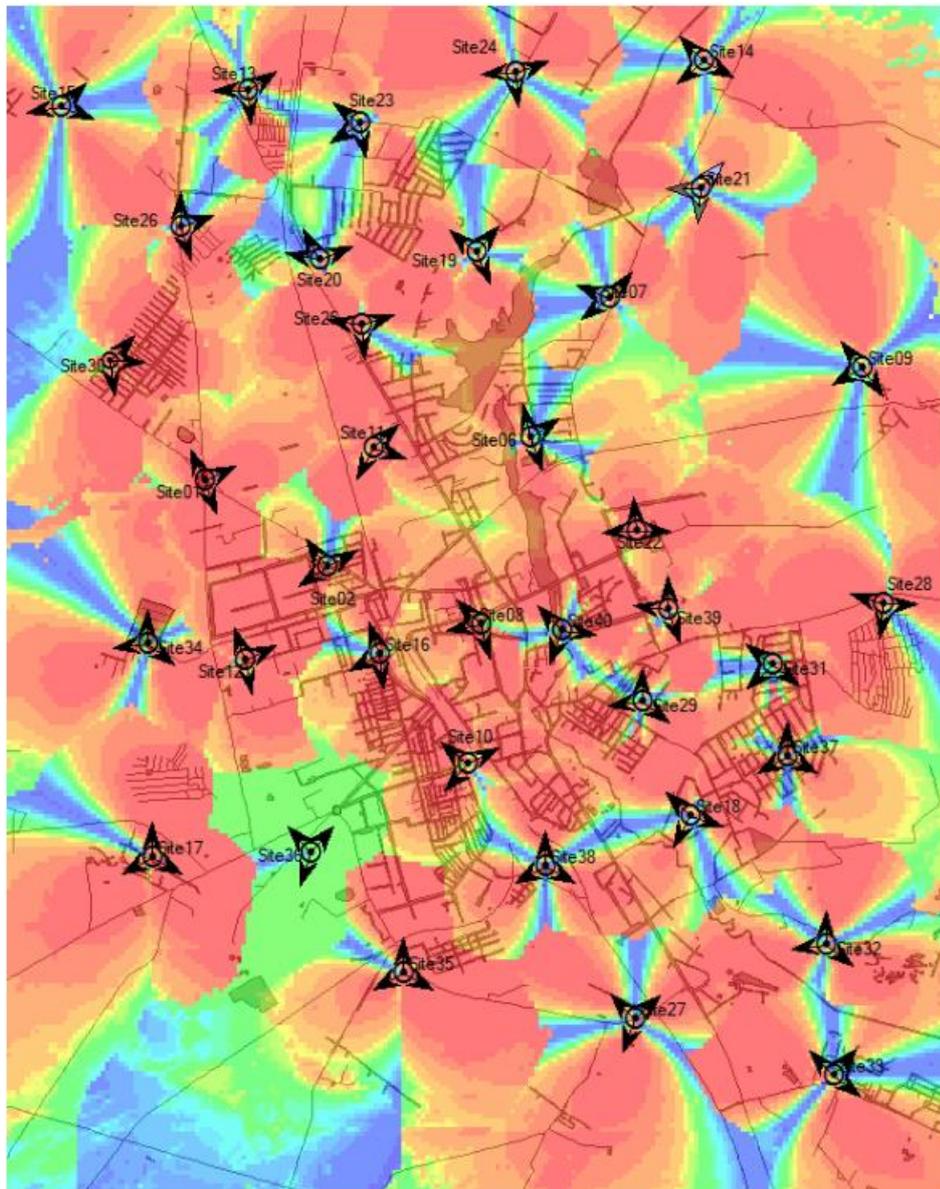


Рис. 12.10. Карта с данными скорости передачи данных в линии «вниз»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебно-методическом пособии «Методы передачи сигналов с расширением спектра» рассмотрены общие сведения об организации и особенностях функционирования систем передачи данных с расширением спектра. Использование систем передачи данных с расширением спектра позволяет формировать надежные инфокоммуникационные сети с высокими характеристиками и параметрами. Одним из главных элементов таких сетей является оборудование абонентов, которое строится с использованием разнообразных функциональных устройств – усилителей, смесителей, переключателей, модуляторов, кодеров и т. д. Функционирование систем передачи сопровождается выполнением разнообразных процедур модуляции, кодирования, генерации псевдослучайных кодов и рядом других операций. Особенности работы таких устройств и выполнение функциональных процедур рассмотрено в практических работах № 1–5.

Важное значение для практических целей приобретают процедуры планирования радиосетей стандарта UMTS и стандарта IEEE 802.11, которые обычно включают в себя определение допустимых потерь на пути распространения сигнала, величины абонентской емкости, особенностей территориального покрытия и их оптимизация на сети. В шестой практической работе выполняется изучение особенностей определения допустимых потерь на пути распространения сигнала в беспроводных линиях связи. В седьмой практической работе рассмотрены методики расчета бюджета потерь радиолиний в системах сотовой связи стандарта UMTS. В восьмой практической работе изучаются особенности расчета предельной емкости соты в системах сотовой связи стандарта UMTS.

Исследование оборудования стандарта IEEE 802.11а изложено в девятой и десятой практических работах. В девятой работе выполняется исследование общих принципов построения оборудования стандарта IEEE 802.11. В десятой практической работе изучаются основные характеристики оборудования стандарта IEEE 802.11b.

Вопросы проектирования сотовых сетей связи и исследования основных процедур моделирования их зон покрытия рассмотрены в одиннадцатой и двенадцатой практических работах. В этих работах изучается программный комплекс ATOLL, который предназначен для проектирования сотовых сетей связи и исследования основных процедур моделирования зон покрытия систем сотовой связи всех основных стандартов связи.

.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тихвинский, В. О. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев. – М. : Эко-Трендз, 2007. – 400 с.
2. Overview of 3GPP Release 99 Summary of all Release 99 Features [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_cn/tsg\\_cn/TSGN\\_23/Docs/PDF/NP-040010.pdf](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_cn/tsg_cn/TSGN_23/Docs/PDF/NP-040010.pdf).
3. NSN WCDMA BTS Overview [Электронный ресурс] // Nokia Siemens Networks. – Режим доступа: [NSN\\_WCDMA\\_BTS\\_Overview.pdf](#).
4. Единый технический справочник РЭС и ВЧУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ets-res.ru/list/f3853/>.
5. Основы управления использованием радиочастотного спектра : в 3 т. / под ред. М. А. Быховского. – М. : КРАСАНД, 2012. – Т. 3 : Частотное планирование сетей телерадиовещания и подвижной связи. Автоматизация управления использования радиочастотного спектра. – 368 с.
6. Мищенко, В. Н. Изучение принципов проектирования систем подвижной радиосвязи стандарта GSM : метод. пособие к практ. занятиям по дисциплине «Системы подвижной радиосвязи и радиоопределения» / В. Н. Мищенко. – Минск : БГУИР, 2008. – 42 с.
7. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х. Кааранен [и др.] ; пер. с англ. Н. Л. Бирюкова. – М. : Техносфера, 2007. – 464 с.
8. Невдяев, Л. М. Мобильная связь 3-го поколения / Л. М. Невдяев ; под ред. Ю. М. Горностаева. – М. : Связь и бизнес, 2000. – 208 с.
9. Берлин, А. Н. Цифровые сотовые системы связи / А. Н. Берлин. – М. : Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
10. СТБ 1356–2011. Системы сотовой подвижной электросвязи. Основные технические требования. – Минск : Госстандарт, 2011. – 38 с.
11. Flexi WCDMA RF Module and Remote RF Head Description [Электронный ресурс] // Nokia Siemens Networks. – Режим доступа: [Flexi\\_WCDMA\\_RF\\_Module\\_and\\_Remote\\_RF\\_Head.pdf](#).

12. Антенны, используемые в сетях стандарта UMTS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tssonline.ru/articles2/fix-op/anten-dlya-bazov-stanciy-setey-umts>.
13. Ипатов, В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов: принципы и приложения / В. П. Ипатов. – М. : Мир связи, 2007. – 488 с.
14. Holma, H. WCDMA for UMTS / H. Holma, A. Toskala. – John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 450 p.
15. NSN BTS Description & Characteristics [Электронный ресурс] // Nokia Siemens Networks. – Режим доступа: NSN\_BTS\_Product\_Description.pdf.
16. Карлашук, В. И. Электронная лаборатория на IBM PC: программа Electronics Workbench и ее применение / В. И. Карлашук. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Солон-Пресс, 2008. – 726 с.
17. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi : учеб. пособие / Е. В. Смирнова [и др.] ; под общ. ред. А. В. Пролетарского. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 446 с.
18. Мищенко, В. Н. Сети радиодоступа систем сотовой радиосвязи с кодовым разделением каналов : учеб.-метод. пособие для дисциплин «Системы подвижной радиосвязи и радиоопределения» и «Системы обмена информации в автомобильной технике» / В. Н. Мищенко. – Минск : БГУИР, 2016. – 65 с.
19. Ликбез по антеннам: диаграмма направленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dzen.ru/media/nag/likbezpo-antennam-diagramma-napravlennosti-5dce676ee482af743b16bb68>.
20. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : Эко-Тренз, 2005. – 392 с.
21. Тихвинский, В. О. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, В. А. Коваль. – М. : Медиа Паблшер, 2019. – 376 с.

*Учебное издание*

**Мищенко Валерий Николаевич**

**МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ  
С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

Редактор *Ю. В. Ляховец*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 30.10.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 9,65. Уч.-изд. л. 8,6. Тираж 30 экз. Заказ 237.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск