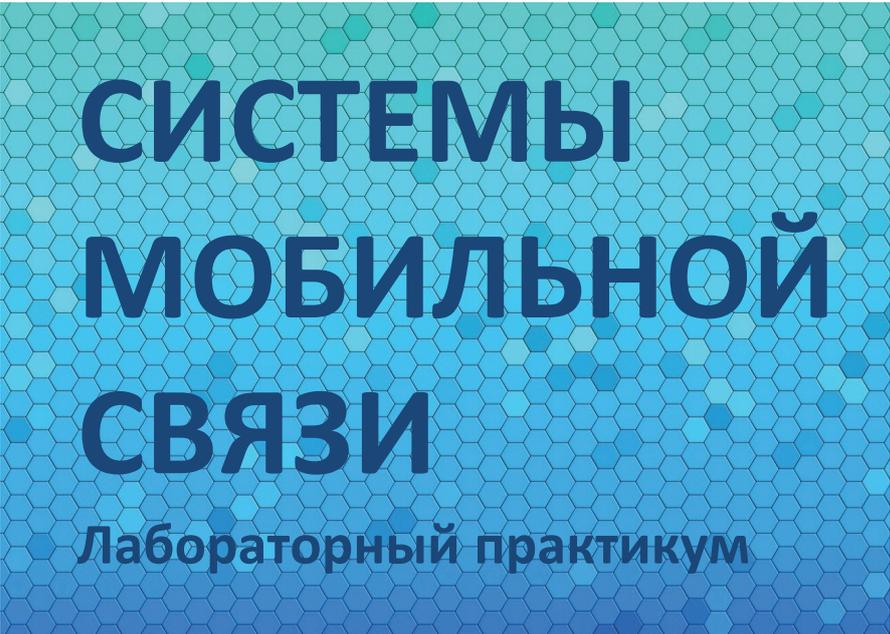


Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Н. Н. Буснюк**  
**Г. И. Мельянец**



**СИСТЕМЫ  
МОБИЛЬНОЙ  
СВЯЗИ**

**Лабораторный практикум**

Минск 2018

УДК 621.391(076.5)

ББК 32.84я76

Б92

Рассмотрен и рекомендован к изданию редакционно-издательским советом Белорусского государственного технологического университета.

**Р е ц е н з е н т ы :**

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» *О. В. Герман*;

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информатики и веб-дизайна  
Белорусского государственного технологического  
университета *Д. М. Романенко*

**Буснюк, Н. Н.**

Б92 Системы мобильной связи : лабораторный практикум для студентов специальности 1-98 01 03 «Программное обеспечение информационной безопасности мобильных систем» / Н. Н. Буснюк, Г. И. Мельянец. – Минск : БГТУ, 2018. – 105 с.

Лабораторный практикум содержит семь лабораторных работ и руководства по применению соответствующих программных средств. Лабораторные работы № 1–3 направлены на приобретение навыков работы с электронной картой местности, а также выполнение расчетов основных параметров и моделирование сетей мобильной связи с применением демонстрационного программного пакета «Radio Planning System». Лабораторные работы № 4–6 посвящены моделированию и анализу помехоустойчивости цифровых систем связи с применением среды MATLAB и пакета прикладных программ Simulink. Лабораторная работа № 7 направлена на разработку программного приложения для планирования и расчета характеристик сетей мобильной связи.

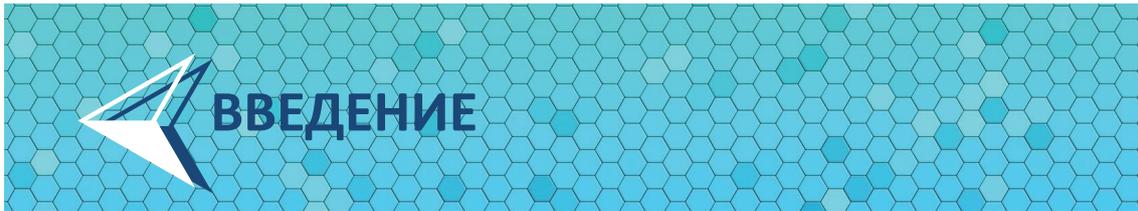
Пособие предназначено для выполнения заданий на занятиях по курсу «Системы мобильной связи» для специальности «Программное обеспечение информационной безопасности мобильных систем», а также может быть полезно магистрантам и аспирантам, изучающим данную предметную область, и преподавателям.

УДК 621.391(076.5)

ББК 32.84я76

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2018

© Буснюк Н. Н., Мельянец Г. И., 2018



Математическая модель является удобным и эффективным инструментом анализа характеристик исследуемого объекта. Хорошая модель, адекватно описывающая объект, позволяет изучить его поведение как в типовых, так и в критических ситуациях, что сделать физически часто бывает невозможно из-за опасности разрушения объекта. Кроме того, наличие модели объекта позволяет легко изменять его параметры, что в реальности может быть сопряжено с большими временными и материальными затратами.

Сложной является задача моделирования беспроводных радиосетей передачи данных. Особенность таких сетей, выделяющая их из огромного разнообразия сетей передачи данных, состоит в наличии радиоканала – объекта, отсутствующего у проводных сетей и определяющего показатели качества передачи информации в радиосетях. В проводных сетях передачи данных канал связи в рабочем состоянии «закрит» для всех сигналов кроме «полезного», сформированного в передатчике источника информации. Соответственно, помехи в таких сетях возникают в передатчике источника информации и в приемнике получателя информации – устройствах, согласующих эти источник и получатель с каналом связи. Причинами помех в этом случае могут быть сигналы от других источников информации, подключенных к этому же передатчику, а также неидеальность характеристик передатчика и приемника. Канал связи беспроводных радиосетей передачи данных (радиоканал) «открыт», вследствие чего в таких сетях к помехам, характерным для проводных сетей, добавляется огромное множество помех, попадающих в приемник через этот открытый радиоканал. Соответственно, к прежним источникам помех добавляются многочисленные источники электромагнитных излучений, расположенные в том же, что и рассматриваемая сеть, регионе.

Таким образом, в случае беспроводных радиосетей передачи информации первостепенную роль играет проблема электромагнитной совместимости (ЭМС), означающая в данном случае способность различных их компонентов одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии непреднамеренных помех, не создавая при этом недопустимых помех друг другу.

Решение данной проблемы связано с оптимальным выбором мест размещения приемопередающей аппаратуры и назначением оптимальных режимов ее работы, в первую очередь мощности и частоты излучения. Этап решения такой задачи в процессе проектирования новой радиосети называется частотно-территориальным планированием.

Помимо частотно-территориального плана, ЭМС различных сетей зависит от применяемых в них принципов и алгоритмов преобразования информации. Все они, а также мощность, частотный диапазон излучаемого сигнала и ключевые параметры радиоаппаратуры регламентированы в соответствующих стандартах. Проблемы выработки нового или проверки действующего стандарта в различных условиях также удобнее всего решать с помощью моделирования характеристик сети. Кроме того, модель сети оказывает помощь и при верификации качества исполнения аппаратуры, с неидеальностью характеристик которой связано дополнительное снижение энергетического потенциала сети.

В настоящее время известно множество программных средств моделирования частотного характера. Для моделирования электронных схем применяются программы схемотехнического моделирования MicroCAP, MicroLOGIC, Pspice, Design Center, Electronics WorkBench и др. Они содержат обширные библиотеки полупроводниковых и схемных компонентов и представляют результаты в привычном для пользователя виде, например, в виде осциллограмм их виртуальных осциллографов или показаний виртуальных вольтметров или амперметров. Однако применение таких систем носит частный и потому довольно ограниченный характер.

Система MATLAB + Simulink предназначена для решения более сложной задачи – моделирования блочных динамических систем и устройств произвольного назначения. Для этого пришлось применить укрупненные модели ряда компонентов, благодаря чему стало возможным моделирование сложных систем и устройств.

MATLAB представляет собой программный продукт, позволяющий производить программный расчет, а также моделирование, разработку и отладку различных систем и устройств, в том числе систем мобильной связи (СМС).

Эффективность использования MATLAB определяется:

- достаточно простым интерфейсом пользователя;
- большим количеством моделей функциональных устройств (в частности, элементов систем связи);
- возможностью создавать свои модели;
- разнообразием видов анализа функциональных устройств и систем.





# РАБОТА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ RPS-2

## 1.1. Краткие сведения по моделированию систем радиосвязи

Целью моделирования радиосетей является решение следующих ключевых задач:

- 1) частотно-территориальное планирование сети, обеспечивающее минимизацию внутрисистемных помех, максимальный охват территории с требуемым качеством передачи информации и ЭМС с существующими радиотехническими средствами;
- 2) верификация характеристик действующей сети;
- 3) оптимизация методов преобразования и передачи информации проектируемой сети;
- 4) оптимизация параметров оборудования, предназначенного для работы в данной сети.

Для решения перечисленных задач моделирования радиосетей требуются следующие исходные данные:

1. Карта местности, необходимая для адекватного описания условий распространения сигналов в рассматриваемом регионе; при использовании модели в компьютерных автоматизированных системах проектирования радиосетей карта местности должна быть представлена в электронном виде в одном из стандартных форматов (например, «MapInfo» или «Панорама»).

2. Сведения о законе распределения абонентов (трафике) на рассматриваемой территории и их характеристиках (удельной эрланговой нагрузке), заданные аналитически или представленные в обменном формате картографических данных.

3. Технические характеристики планируемой сети (технология передачи и обработки информации, частотный диапазон, требуемое отношение сигнал/шум и т. д.), указанные в ее стандарте.

4. Характеристики применяемого оборудования.

5. Координаты и технические характеристики радиосредств, функционирующих в рассматриваемом регионе, необходимые для расчета показателей ЭМС проектируемой и действующих в данном регионе сетей.

В связи с многообразием и сложностью задач моделирования радиосетей трудно рассчитывать на реализацию в одной универсальной модели полного набора функций, необходимых для решения всех перечисленных задач. Поэтому в настоящее время сложилось несколько специализированных типов автоматизированных компьютерных систем анализа и оптимизации характеристик беспроводных сетей, каждому из которых присущи свои особенности применяемых моделей. Среди них следует выделить четыре ключевых типа:

– системы частотно-территориального планирования радиосетей (применяются на этапе развертывания новых или модернизации существующих радиосетей различного назначения для оптимального выбора мест и состава оборудования приемопередающих станций);

– системы, обеспечивающие решение задач электромагнитной совместимости радиосетей (применяются, как и первые, на этапе развертывания новых или модернизации существующих радиосетей различного назначения для согласования их параметров с параметрами других сетей с целью минимизации взаимных помех);

– системы мониторинга качества работы существующих сетей (применяются для измерения и последующего анализа характеристик сети в реальных условиях ее функционирования);

– системы, предназначенные для оптимизации принципов передачи информации и параметров оборудования разрабатываемых сетей.

На рис. 1.1 изображены важнейшие составляющие радиосетей, необходимые для решения ключевых задач их проектирования, а также основные компоненты применяемых при этом компьютерных моделей.

Ключевым элементом математической модели радиосети является блок расчета уровня сигнала в заданной точке приема от заданного источника и положенная в его основу модель распространения сигнала (модель радиоканала). Важным также является блок расчета отношения сигнал/(шум + помеха), используемого для определения всех важнейших характеристик сети.

Лабораторные работы данного раздела предназначены для освоения студентами принципов частотно-территориального планирования



сетей мобильной связи (СМС) с помощью программного продукта RPS-2 (Radio Planning System) – разработки кафедры радиоэлектроники Московского института электронной техники.

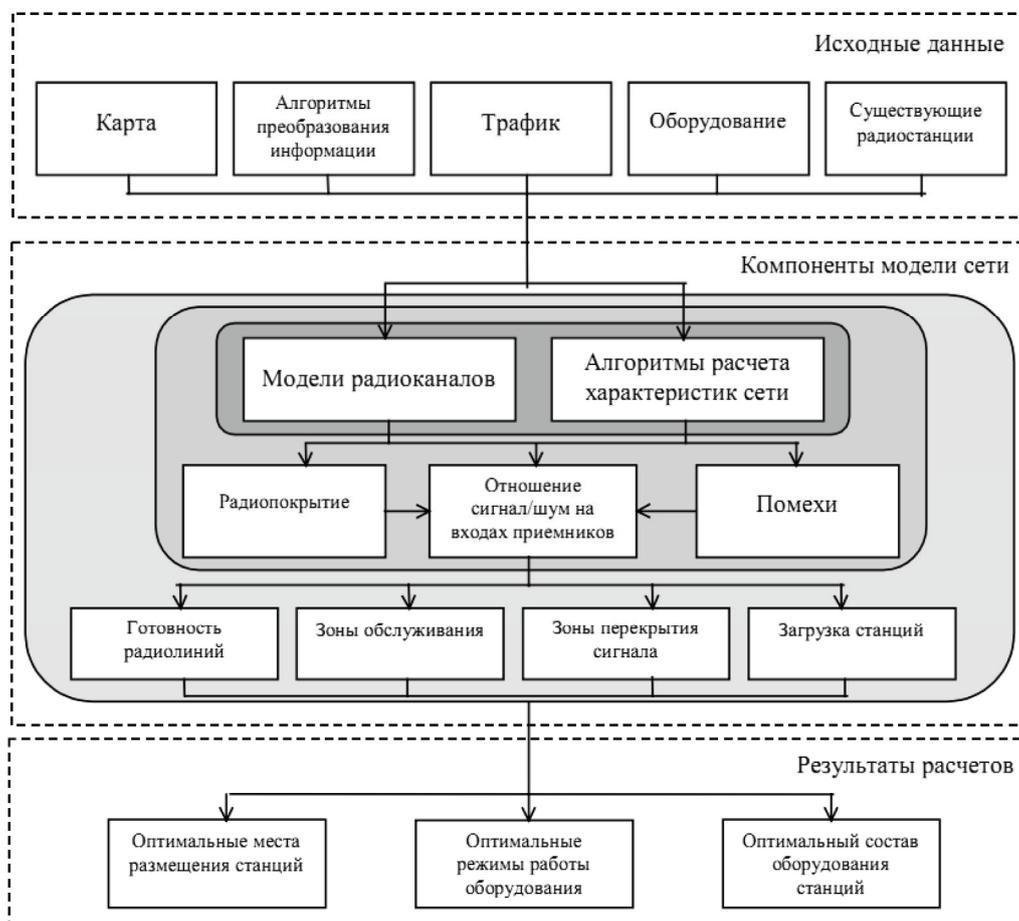


Рис. 1.1. Компоненты модели радиосети

Исходными данными для проведения расчетов являются:

- 1) цифровые карты местности;
- 2) база данных с характеристиками применяемого оборудования (частотный диапазон, диаграммы направленности и усиления антенн, частотные и энергетические характеристики приемопередатчиков, потери в фидерах и т. д.).

Программа позволяет:

– размещать радиостанции в заданном месте рассматриваемой территории, работающие в любом стандарте (NMT-450, AMPS, D-AMPS, GSM, IS-95, SmarTrunk, TETRA, MPT 1327, ED ACS и т. д.); кроме того, имеется возможность определить новый стандарт

проектируемой сети, введя его основные параметры: частотный диапазон, ширину канала и т. д.;

- определять для радиостанций оптимальный состав оборудования из базы данных; задавать и редактировать распределение плотности трафика в рассматриваемом регионе, что позволяет анализировать характеристики сотовых и транкинговых систем в условиях различной загрузки;

- рассчитывать, отображать на экране и выдавать на печать основные характеристики планируемой сети;

- рассчитывать показатели электромагнитной совместимости (уровень взаимных помех) планируемой сети с другими сетями;

- оптимизировать параметры планируемой сети путем изменения местоположения радиостанций, а также варьируя состав и технические характеристики размещаемого на них оборудования;

- отображать результаты измерений уровня принимаемого сигнала и сравнивать их с результатами расчета с последующей оптимизацией параметров применяемых математических моделей расчета.

Программу RPS-2 можно применять для планирования как макро-, так и микроячеек сотовых сетей, включая микросотовые системы, работающие внутри зданий. Как и во всех системах подобного рода, ключевым компонентом программы RPS-2 является положенная в ее основу модель радиоканала. В RPS-2 заложена возможность выбора пользователем одной из нескольких моделей распространения сигналов, в том числе строгой модели (модель RPS), максимально полно учитывающей все основные факторы, влияющие на уровень принимаемого сигнала (рис. 1.2).

Рассчитанные с помощью строгой модели уровни сигналов от всех источников сигнала в рассматриваемом регионе являются основой для выполнения анализа их электромагнитной совместимости. На этом этапе определяются источники, частотный диапазон излучения которых пересекается с диапазоном анализируемого приемника и выдается отчет об уровне помех от каждого такого излучателя с указанием степени влияния каждого из них на ухудшение порогового сигнала на входе данного приемника.

Эти данные позволяют принять верное решение о работоспособности проектируемой сети и оптимизировать места расположения и характеристики используемого оборудования.

Перед выполнением определенных действий представлены соответствующие основные теоретические положения. Лабораторный практикум поможет студенту в изучении практического материала и приобретении навыков решения конкретных практических задач.



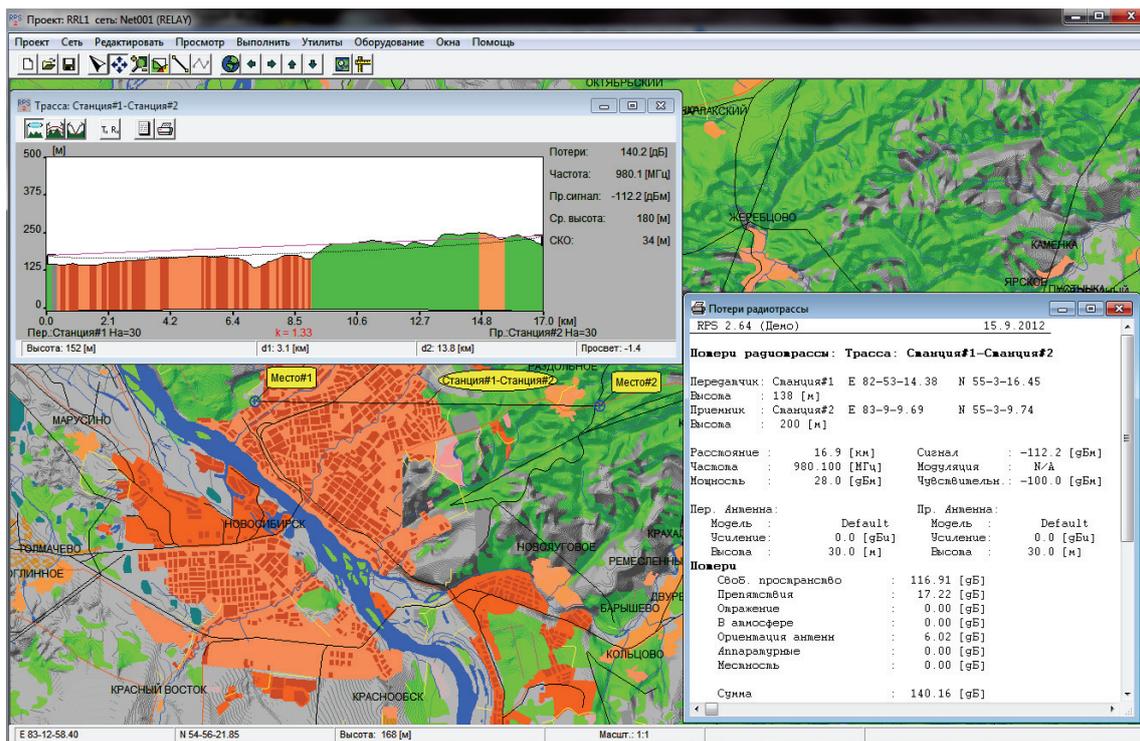


Рис. 1.2. Анализ в программе RPS-2 профиля радиолинии и факторов, влияющих на характеристики распространения сигналов

Программный пакет RPS-2 представляет собой среду, позволяющую производить приближенный расчет параметров, а также моделирование и разработку различных систем и сетей мобильной связи.

Эффективность использования пакета RPS-2 определяется:

- 1) достаточно простым интерфейсом пользователя;
- 2) большим количеством моделей функциональных блоков (в частности, элементов систем связи);
- 3) возможностью размещать элементы сети связи, а также редактировать карту местности;
- 4) разнообразием видов функциональных элементов систем подвижной связи.

## 1.2. Возможности пакета RPS-2

Программный пакет RPS-2 позволяет проводить частотно-территориальное планирование и выполнять все необходимые расчеты для оценки качества связи и зон обслуживания радиосети на основе реальных данных о рельефе местности.

Функции RPS следующие:

1. Размещение базовых станций с привязкой по географическим координатам или по месту на цифровой электронной карте.
2. Размещение препятствий (не отраженных на цифровой карте) с привязкой по географическим координатам или по месту на цифровой электронной карте.
3. Редактирование карты местности путем задания дополнительных высот для отдельных типов местности (лес, городские кварталы и т. п.).
4. Задание и редактирование карты трафика на рассматриваемой территории.
5. Поддержка локальных баз данных оборудования: антенн, диаграмм направленности, приемопередатчиков.
6. Отображение профиля местности между двумя выбранными точками.
7. Определение и отображение точек прямой видимости в заданной окрестности базовой станции.
8. Расчет и отображение уровня принятого сигнала в заданной окрестности базовой станции.
9. Задание коэффициентов, корректирующих потери распространения, для отдельных типов местности.
10. Вывод результатов расчетов на печатающее устройство.
11. Преобразование электронных карт из форматов MAPINFO и PLANET во внутренний формат RPS.

Для сотовых сетей RPS позволяет провести:

- расчет максимального уровня принятого сигнала от нескольких базовых станций;
- расчет зон обслуживания для нескольких базовых станций;
- оценку мощности передатчика абонента, необходимой для связи с базовой станцией;
- расчет отношения сигнал/помеха в указанной области;
- расчет зон перекрытия сигнала от базовых станций;
- оценку загруженности базовых станций;
- расчет максимального уровня принятого сигнала вдоль выбранного маршрута;
- статистический анализ и отображение результатов измерения принятого сигнала;
- сравнение результатов расчета уровня принятого сигнала вдоль выбранного маршрута с реальными измерениями.



### 1.3. Моделирование систем связи в RPS-2

*Порядок работы с программой:*

1) задать общие параметры для нового проекта, имена рабочих каталогов и выбрать тип первой сети проекта;

2) открыть новый проект. При этом создается описание первой «пустой» сети;

3) установить параметры сети, выбрав радиостандарт или задав собственный набор сетевых параметров;

4) настроить параметры, описывающие свойства различных типов местности: высоту, коэффициенты, корректирующие потери распространения, распределение трафика;

5) осуществить планирование сети связи. В ходе этой операции на цифровой карте размещаются базовые станции и выбираются их параметры. В радиорелейных сетях устанавливаются связи между станциями (формируются радиолинии). При необходимости в базы данных оборудования добавляются новые элементы;

6) выполнить необходимые расчеты и распечатать (или сохранить) результаты. В расчетах во внимание принимаются лишь объекты, определенные в данной сети.

В рамках одного проекта можно сформировать несколько сетей разных типов. Однако в данной версии (RPS-2) наличие других сетей не учитывается в расчетах, т. е. сети независимы друг от друга.

Прежде чем начать работу с RPS, необходимо подготовить цифровую карту района и сформировать базы данных оборудования.

*Создание проекта в RPS.* Проект RPS включает в себя всю информацию, связанную с планированием радиосетей в некотором регионе (рабочей области), который определяется цифровой картой местности. Для одного региона может быть создано несколько проектов, но в одном проекте нельзя объединить несколько регионов, определяемых разными цифровыми картами.

Проект сохраняется на диске в текстовом файле с расширением «рго».

В состав проекта входят следующие компоненты:

- имя каталога с цифровой картой региона;
- имя каталога с базами данных оборудования;
- имя рабочего каталога, в котором сохраняются результаты расчетов;
- общие параметры, относящиеся ко всему региону;

- описание сетей, размещенных в данном регионе;
- перечень базовых станций и их параметров для каждой сети;
- перечень радиолиний для радиорелейных сетей;
- информация о выполненных расчетах;
- перечень дополнительных препятствий, корректирующих цифровую карту, и их параметры;
- характеристики типов местности, учитываемые в расчетах;
- атрибуты объектов, отображаемых на экране.

Развитие проекта предусматривает размещение новых объектов (сетей, станций, радиолиний и т. д.), изменение параметров и удаление ранее созданных объектов. Результаты расчетов, требующих больших затрат времени, сохраняются на диске, информация о них хранится в проекте и используется для отображения результатов без проведения повторных расчетов. Базы данных оборудования могут расширяться и редактироваться независимо от проекта и использоваться в нескольких проектах одновременно. Следует учитывать, что изменение параметров оборудования в базе данных скажется на результатах расчетов во всех проектах, ссылающихся на эту базу данных.

#### 1.4. Интерфейс RPS-2

*Главное окно.* В RPS главное окно используется для отображения карты местности и размещения объектов (станций, радиолиний, маршрутов, препятствий и т. п.).

Главное окно можно перемещать для отображения различных участков цифровой карты региона. В главном окне выполняются операции масштабирования карты. При перемещении указателя мыши в строке состояния в нижней части главного окна отображаются географические координаты текущей точки и высота точки над уровнем моря.

*Вспомогательные окна.* Вспомогательные (дочерние) окна используются для вывода результатов расчетов. Дочерние окна могут быть перемещены в любое место в пределах главного окна и могут быть «свернуты» в пиктограмму.

Содержимое вспомогательного окна, имеющего в верхнем левом углу значок *iS*, может быть выведено на печать. Содержимое текстовых окон может быть сохранено в файле.



*Действия с мышью.* С помощью мыши в RPS выполняются следующие действия:

- выбор команд из главного меню;
- выбор места при создании новых объектов;
- доступ к объектам, отображенным на экране, для редактирования их параметров;
- выбор точек для построения профиля местности;
- задание прямоугольных областей для расчетов и печати.

Левая кнопка мыши используется для выбора команд из меню и доступа к объектам; правая кнопка – для вывода на экран контекстных всплывающих меню, содержащих набор команд, зависящий от режима работы и типа объекта, над которым нажата правая кнопка мыши.

В зависимости от режима работы курсор мыши может принимать одну из следующих форм:

-  вид курсора в режиме выбора/создания объектов;
-  курсор над объектом в режиме выбора объектов;
-  вид курсора в режиме масштабирования карты;
-  курсор над объектом в режиме перемещения объектов;
- ✓ вид курсора в режиме выбора линий прямоугольных областей.

*Главное меню.* В RPS используется иерархическая система меню. Для выбора действия или перехода к следующему уровню меню следует поместить указатель мыши над соответствующим пунктом меню и нажать левую кнопку мыши. Для возврата на предыдущий уровень меню следует нажать на клавишу «Esc». Ниже приведен перечень пунктов главного меню.

**Проект** – операции с проектом (открыть, создать новый проект, сохранить, закрыть, настроить общие параметры проекта, настроить параметры печати, завершить работу RPS).

**Сеть** – создание новой сети в текущем проекте, переключение между сетями, редактирование общих параметров сети.

**Редактировать** – редактирование параметров объектов текущей сети.

**Просмотр** – выбор вида отображения карты местности, выбор масштаба карты, включение (выключение) отображения результатов расчетов.

**Выполнить** – выполнение расчетов.

**Утилиты** – настройка общих параметров отображения объектов.

**Оборудование** – доступ к базам данных оборудования.

**Окна** – стандартное меню Windows для управления дочерними окнами.

**Помощь** – вызов справочной подсистемы RPS.

*Панель инструментов.* Линейка инструментов расположена под главным меню и содержит пиктограммы для переключения режимов работы и выполнения часто используемых команд. Ниже приведен список пиктограмм и соответствующие им команды меню.

-  создать новый проект (меню Проект/Новый);
-  открыть существующий проект (меню Проект/Открыть);
-  сохранить проект (меню Проект/Сохранить);
-  установить режим создания/редактирования параметров объектов (меню Просмотр/Режим редактирования);
-  установить режим перемещения объектов (меню Просмотр/Режим перемещения);
-  установить режим масштабирования карты (меню Просмотр/Режим масштабирования);
-  установить режим выбора прямоугольной области (меню Просмотр/Выбор прямоугольника);
-  установить режим выбора линии для построения профиля (меню Просмотр/Выбор линии);
-  установить режим выбора маршрута (меню Просмотр/Выбор трассы);
-  вывод полной карты региона (меню Просмотр/Навигатор);
-  сдвиг главного окна влево (меню Просмотр/Переместить окно/Влево);
-  сдвиг главного окна вправо (меню Просмотр/Переместить окно/Вправо);
-  сдвиг главного окна вверх (меню Просмотр/Переместить окно/Вверх);
-  сдвиг главного окна вниз (меню Просмотр/Переместить окно/Вниз);
-  настройка параметров карты (меню Утилиты/Параметры карты);
-  настройка параметров объектов (меню Утилиты/Параметры объектов).

*Использование цифровых карт.* С каждым проектом RPS должна быть связана цифровая карта местности, в которой проводится моделирование. Имя каталога, в котором размещается карта, задается при создании нового проекта. В ходе работы карта местности используется для размещения объектов (станций, радиолиний) и отображения результатов расчетов.

Цифровая карта включает в себя три составляющих: растровые, векторные и текстовые данные. Растровые данные содержат информацию



о высоте и типе местности для каждой точки местности. Эта информация используется во всех расчетах и является обязательной. Векторные и текстовые данные описывают вспомогательные объекты, такие как дороги, реки, названия населенных пунктов. Векторные и текстовые объекты используются только при отображении карты и не являются обязательными.

В RPS реализованы три базовые формы представления растровой информации:

- карта типов местности. Цветом выделяются различные типы местности;

- карта относительных высот. Высота местности выделяется оттенком серого цвета, высоким точкам соответствует более светлый оттенок;

- карта рельефа.

На любой из перечисленных видов карт можно дополнительно наложить линии уровня, векторные и текстовые объекты.

*Работа с базами данных RPS.* В RPS-2 поддерживаются следующие базы данных оборудования:

- база данных антенн с диаграммами направленности (файл antenna.sdb);

- база данных приемопередатчиков (файл trxdata.sdb);

- база данных волноводов (файл wgdata.sdb).

Параметры оборудования, содержащегося в базах данных, используются для инициализации параметров станций. При создании новой станции указывается тип антенны, приемопередатчика и волновода. Программа RPS-2 выбирает параметры указанных устройств из базы данных и копирует их в набор параметров станции. Некоторые параметры могут быть уточнены для конкретной станции. Базы данных должны размещаться в одном каталоге, путь к которому указывается при создании проекта. Одни и те же базы данных оборудования могут использоваться в разных проектах.

## **1.5. Лабораторная работа № 1 ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СЕТИ GSM-900**

*Цель работы:* приобретение навыков работы с цифровой картой местности; выполнение расчетов, необходимых для оценки качества связи и зон обслуживания радиосети на основе реальных данных о рельефе местности.

### *Краткие теоретические сведения*

Сотовые системы реализуют двунаправленную беспроводную связь между фиксированной частью системы, т. е. расположенной в соответствующем месте базовой станции (БС), и мобильными станциями (МС), которые перемещаются по территории, охватываемой системой базовых станций. Зона охвата системы сотовой мобильной связи (ССМС) разделена на подзоны, обслуживаемые базовыми станциями, которые располагаются, как правило, в их центрах. Зону покрытия одной базовой станции можно символически обозначить правильным шестиугольником, поэтому ее часто называют сотой. Сота – это территория, обслуживаемая одной БС при всенаправленных антеннах. Причина деления зоны обслуживания системы на соты – недостаточная емкость единственной БС, которая имела бы достаточную мощность и могла бы обеспечить радиопокрытие всей территории в той же ограниченной полосе частот, что и система БС. Под емкостью здесь понимается максимальное количество мобильных станций, одновременно обслуживаемых системой, приходящихся на 1 Гц и на 1 км<sup>2</sup>.

В ССМС, в которой используется метод множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA), каждой МС для передачи сигнала требуется  $B$  Гц, и каждой ССМС выделен частотный диапазон шириной  $M \times B$  Гц. Каждый диапазон шириной  $B$  Гц можно назвать каналом.

Система с одной БС, излучающей мощный сигнал и покрывающей всю территорию, предоставляет  $M$  каналов и может одновременно обслужить только  $M$  мобильных станций. Разделение зоны покрытия системы на соты и их нумерация позволяют многократно использовать каналы, если эти  $M$  каналов соответствующим образом распределить по  $N$  различным типам сот.

Рассмотрим правила проектирования сот и распределения каналов «на инженерном уровне». При этом предполагается гексагональная форма сот и приблизительно равный их размер. Таким образом, задача проектирования сети состоит в разбиении обслуживаемой территории на соты и сопоставлении каждой соте частоты или группы частот.

Ключевой принцип работы сотовой системы заключается в многократном использовании одних и тех же частотных каналов в различных сотах, расположенных соответствующим образом в зоне покрытия системы. Основой частотно-территориального планирования (ЧТП) является кластер. Кластер образован совокупностью соседних



сот, в которых используются разные частотные группы. Число таких сот в кластере называется его размерностью. Все частотные каналы системы делят между БС, входящими в один кластер.

Если радиус окружности, описанной вокруг каждого шестиугольника, равен  $R$ , то расстояние между двумя соседними шестиугольниками равно  $\sqrt{3}R$ . Примем его за единицу длины. В системе координат с углом между осями координат, равным  $60^\circ$ , расстояние от центра любого шестиугольника до начала координат составляет

$$D = \sqrt{3}R\sqrt{i^2 + ij + j^2}, \quad (1.1)$$

где  $i$  и  $j$  – координаты центра рассматриваемого шестиугольника, выраженные в принятых единицах длины, равных  $\sqrt{3}R$  (рис. 1.3).

Площадь одной гексагональной соты радиуса  $R$  равна

$$A_R = \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2, \quad (1.2)$$

а площадь большого шестиугольника, равного сумме  $N$  площадей шестиугольников радиуса  $R$ , центры которых расположены на расстоянии  $D$  друг от друга, составляет

$$A_{D/\sqrt{3}} = \frac{3}{2}\sqrt{3}\left(\frac{D}{\sqrt{3}}\right)^2. \quad (1.3)$$

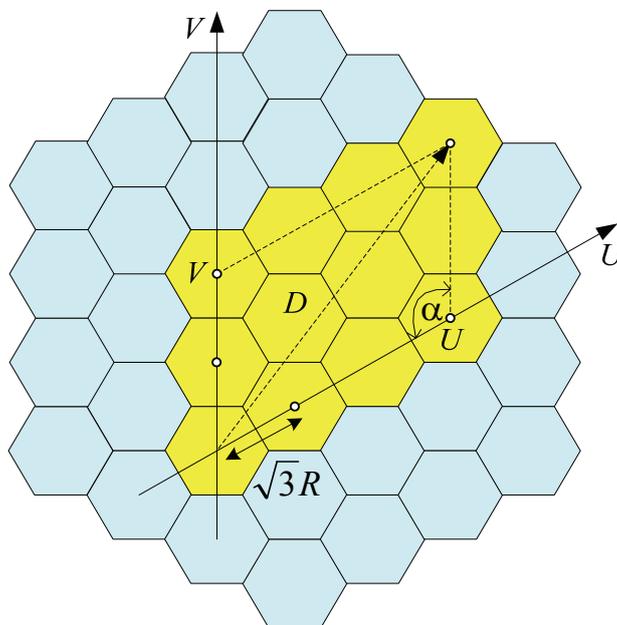


Рис. 1.3. Разделение зоны покрытия системы на соты

Количество  $N$  сот в кластере:

$$N = i^2 + ij + j^2. \quad (1.4)$$

Очевидно, что количество сот в кластере не ограничено. Кластер может состоять из одной, трех, четырех, семи, двенадцати сот и т. д.

На основании (1.1) и (1.4) можно получить важное соотношение:

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N}. \quad (1.5)$$

Параметр  $Q$  называется *коэффициентом ослабления внутриканальных помех*.

Расстояние  $D$  зависит от отношения мощности сигнала  $S$  к мощности помехи  $I$ . В свою очередь, это отношение зависит от количества влияющих друг на друга сот  $K_0$  согласно формуле

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{k=1}^{K_0} I_k}, \quad (1.6)$$

где  $I_k$  – средняя мощность помех, генерируемых  $k$ -й сотой.

Мощность сигнала, принимаемого на расстоянии  $d$  передающей антенны, пропорциональна  $d^{-\gamma}$ .

При распространении в свободном пространстве  $\gamma = 2$ , в то время как при двулучевом распространении  $\gamma \approx 4$ . В действительности  $\gamma$  лежит в интервале от 2 до 5,5 в зависимости от условий распространения.

При равной мощности, излучаемой БС, отношение сигнал/внутриканальная помеха зависит только от геометрических свойств распределения сот, расстояний между базовыми станциями, использующими одни и те же частотные каналы, и радиуса зоны радиопокрытия БС.

В традиционных сотовых системах отношение  $S/I$  выбирается таким, чтобы обеспечить качество передачи речи, приемлемое, по крайней мере, для 75% пользователей на 90% области покрытия системы.

Существуют два основных решения проблемы недостаточной величины коэффициента  $Q$  для классического кластера из семи сот и всенаправленных антенн.

Первый путь – это увеличение количества сот в кластере. Однако с увеличением  $N$  уменьшается количество доступных в соте каналов. Если взять следующее после 7 возможное значение  $N$ , т. е.  $N = 12$ , то придется разделить все доступные каналы на 12 подгрупп.

Второе решение заключается в ослаблении внутриканальных помех при использовании секторных антенн, с шириной диаграммы направленности в  $120^\circ$ . Каждая сота разделяется на три сектора. Также возможно разделение сот и на другое количество секторов. На практике разделение сот на секторы используется в сотовых системах стандартов GSM и CDMA.

Разделение на секторы не только уменьшает количество interfering БС, но и оказывает положительное воздействие на физические свойства канала связи. В таких системах разброс задержки импульсного отклика канала будет меньше, чем в сотовых системах с всенаправленными антеннами БС. Благодаря разделению на секторы увеличивается емкость системы, однако это увеличение не удастся полностью использовать, если мобильные станции не будут равномерно распределены по всем секторам. Существуют и другие недостатки разделения на секторы:

- БС секторизованной соты требует большего количества оборудования, особенно высокочастотного;

- мобильные станции, передвигающиеся в разделенных на секторы сотах, чаще меняют каналы, что приводит к увеличению объема сигналов управления;

- снижается *транковая эффективность*. В выделенной соте набор каналов должен быть распределен по секторам. Количество обслуживаемых абонентов останется тем же, что и в сотах без выделения секторов, только в том случае, если количество пользователей в каждом секторе пропорционально количеству выделенных на сектор каналов.

Рассмотрим правила распределения каналов среди сот и секторов. Непосредственное влияние на выбор оказывают *межканальные помехи*. Этот тип помех возникает между сигналами, излучаемыми в одной и той же соте (секторе) на разных несущих частотах. Необходимо минимизировать искажения. Разнос канальных частот  $\Delta f_{\text{зэр}}$  в одной соте определяется формулой

$$\Delta f = 2^G \frac{B}{2}, \quad G = \frac{\gamma \lg \left( \frac{d_0}{d_1} \right)}{L}, \quad (1.7)$$

где  $\gamma$  зависит от среды распространения;  $L$  – крутизна приемного фильтра, дБ на октаву;  $d_0$  и  $d_1$  – расстояния от базовой до мобильных станций (передающей и источника искажений соответственно). На практике для GSM соседние каналы в одной соте разделены полосой в  $3B$  Гц.

Вид модуляции, способы кодирования и формирования сигналов в каналах связи, принятые в GSM, обеспечивают прием сигналов с отношением сигнал/помеха  $S/I = 9$  дБ, в то время как в аналоговых системах тот же показатель равен 17–18 дБ. Поэтому передатчики базовых станций, работающие на совпадающих частотах, могут размещаться в более близко расположенных сотах без потери высокого качества приема сообщений.

Например, в сети GSM с общей полосой 7,2 МГц (36 частот), модель повторного использования частот двумя БС позволяет на одной БС одновременно применять 18 частот (в модели с тремя БС таких частот 12). Емкость сети возрастает на 50%, однако для обеспечения прежнего значения вероятности блокировки канала связи необходимо снижение этого показателя до 40%.

В любой ССМС емкость сетей зависит от количества каналов связи в соте  $N$ , которое, например, для стандартов с временным разделением каналов определяется выражением:

$$N = \frac{1}{k} \cdot \frac{F}{f}, \quad (1.8)$$

где  $F$  – полоса частот ССМС;  $f = F_k/n$  – эквивалентная полоса частот, приходящаяся на один речевой канал;  $F_k$  – полоса частот одного радиоканала;  $n$  – число временных позиций в TDMA кадре;  $F/f$  – число речевых каналов связи;  $k$  – коэффициент повторного использования частот.

В табл. 1.1 приведены значения количества каналов  $N$  на соту для ССМС различных стандартов при разных коэффициентах повторного использования частот.

Таблица 1.1

### Сравнение различных стандартов ССПС

| Характеристики ССПС                                       | Аналоговые | Цифровые              |                      |      |      |
|---|------------|-----------------------|----------------------|------|------|
|   |            | GSM                   |                      | ADC  | JDC  |
|   | NMT-450    | полноскоростной канал | полускоростной канал |      |      |
| Общая полоса частот $F$ , МГц                             | 4,5        | 25                    | 25                   | 25   | 25   |
| Эквивалентная полоса частот на один канал связи $f$ , кГц | 25         | 25                    | 12,5                 | 10   | 8,3  |
| Число речевых каналов связи $F/f$                         | 180        | 1000                  | 2000                 | 2500 | 3000 |
| Коэффициент повторного использования частот $k$           | 7 (3)      | 3 (2)                 | 3 (2)                | 7    | 4    |
| Число каналов на соту $N$                                 | 26 (60)    | 333 (500)             | 666 (1000)           | 357  | 750  |

В стандарт GSM-900 полоса частот, отведенная на один частотный канал, составляет 200 кГц. Согласно плану частот стандарта GSM-900 (рис. 1.4), в этом стандарте 124 частотных канала.

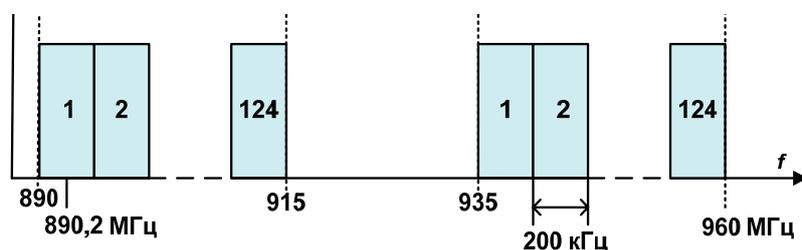


Рис. 1.4. Частотный план стандарта GSM-900

Полоса частот, занимаемая стандартом для приема (или передачи), составляет 25 МГц. Сдвиг между частотами приема и передачи в каждом канале 45 МГц. В канале с номером  $Z$  средняя частота базовой станции, выраженная в мегагерцах, составляет

$$f_{1z} = 890,2 + 0,2Z;$$

средняя частота передачи, выраженная в мегагерцах, определяется так:

$$f_{2z} = 935,2 + 0,2Z.$$

### Порядок выполнения работы

1. Запустить программу RPS-2, нажав левой кнопкой мыши на значок .
2. Выбрать на панели инструментов «Проект → Новый» и ввести имя, выбрать радио-стандарт – GSM.
3. Выбрать местоположения базовых станций (БС): нажав левую клавишу мыши, выбрать «Новое место».
4. Задать параметры БС: имя – BS#1 (BS#2, BS#3), число секторов – 1, антенна – OMNI, поляризация – горизонтальная, приемопередатчик – табл. 1.2, высота передающей антенны –  $h = (30 + N)$  м ( $N$  – номер варианта), фидеры – default.

Таблица 1.2

#### Приемопередатчики

|                  |                    |        |        |                |                    |
|------------------|--------------------|--------|--------|----------------|--------------------|
| Вариант          | 1                  | 2      | 3      | 4              | 5                  |
| Приемопередатчик | Aironet 655<br>900 | BS     | CyLink | TRxCV          | WaveLAN<br>915     |
| Вариант          | 6                  | 7      | 8      | 9              | 10                 |
| Приемопередатчик | Mobile             | CyLink | TRxCV  | WaveLAN<br>915 | Aironet 655<br>900 |

Координаты БС:

BS#1: долгота E 82-50-10.94, широта N 55-3-55.36;

BS#2: долгота E 82-47-55.15, широта N 54-55-52.34;

BS#3: долгота E 83-3-9.96, широта N 54-59-20.30.

5. Задать параметры абонентов: антенна – OMNI, поляризация – горизонтальная. Координаты абонентов приведены в табл. 1.3

Таблица 1.3

**Координаты абонентов**

| Абонент | Наименование координат | Вариант     |             |             |             |             |
|---------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|         |                        | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           |
| 1       | E                      | 83-28-39.42 | 83-35-7.74  | 83-29-34.21 | 83-33-46.74 | 83-30-26.62 |
|         | N                      | 55-10-58.01 | 55-3-39.26  | 55-10-35.20 | 55-6-6.85   | 55-9-46.89  |
| 2       | E                      | 83-23-39.25 | 83-24-38.80 | 83-36-0.15  | 83-35-36.33 | 83-35-7.74  |
|         | N                      | 54-44-40.13 | 54-45-0.25  | 54-58-6.51  | 54-56-27.22 | 54-54-53.30 |
| Абонент | Наименование координат | Вариант     |             |             |             |             |
|         |                        | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          |
| 1       | E                      | 83-34-43.92 | 83-31-4.74  | 83-34-20.09 | 83-31-38.09 | 83-32-49.56 |
|         | N                      | 55-4-27.56  | 55-9-12.01  | 55-5-13.18  | 55-8-39.81  | 55-7-30.04  |
| 2       | E                      | 83-35-50.62 | 83-35-26.80 | 83-33-51.50 | 83-27-35.10 | 83-32-11.45 |
|         | N                      | 54-57-26.26 | 54-55-41.60 | 54-52-33.76 | 54-46-44.91 | 54-50-27.63 |

Сохранить проект в папке «Project» программы RPS-2 под своим именем. Пример: Project\_Lab1\_Ivanov.

6. Анализ рельефа местности и оценка потерь при распространении до наиболее удаленной точки соты, максимального размера для стандарта.

*Выполнить* → *Расчет прямой видимости* (BS#3, расстояние 35 км, вне прямой видимости, ОК).

6.1. Анализ профиля радиолинии.

*Выполнить* → *Просмотр* → *Выбор линии*. Провести линию от БС#3 до точки Абонент#1 и нажать левую клавишу мыши. Результаты расчета потерь при распространении от БС#3 к абоненту занести в отчет. Рассчитать потери радиотрассы, для чего нажать левой кнопкой на значок  и проанализировать вклад различных факторов в потери распространения сигнала.левой кнопкой мыши нажать на значок  окна «Трасса». Занести в отчет результаты расчета потерь при распространении от абонента к БС#3.

После нажатия кнопок ,  и  в окне с профилем радиолинии дополнительно рисуются, соответственно, первая зона Френеля, линии уровня и точки отражения сигнала (если они есть).

## 6.2. Анализ уровня сигнала на трассе.

*Выполнить* → *Просмотр* → *Выбор трассы*. Удерживая левую кнопку мыши, провести линию от БС#3 до точки Абонент#1 и нажать правую клавишу мыши. В появившемся окне «Редактирование трассы» присвоить название трассы и добавить доступные на трассе станции в поле «Выбранные станции». Установить курсор  на линию трассы и нажать правую кнопку мыши и далее левой кнопкой открыть окно «Трасса». В открывшемся окне нажать левой кнопкой на значок , что запускает процесс расчета уровня сигнала вдоль трассы. Нажать одну из кнопок  или  для просмотра результатов расчета, соответственно в виде графика или с помощью цвета. Полученные результаты расчета занести в отчет.

6.3. Выполнить пп. 6.1, 6.2 для Абонент#2.

7. Определение зоны наличия (отсутствия) связи для трех заданных БС.

Выделить три БС с помощью прямоугольника.

*Просмотр* → *Выбор прямоугольника*. Выделить область так, чтобы в нее попали три БС. Поместить курсор в выделенную область, нажать на левую клавишу мыши и присвоить имя области. Далее провести расчеты покрытия для каждой из трех БС.

*Выполнить* → *Расчет покрытия* → *Модель Hata* (или другая по заданию преподавателя) → BS#1 (BS#2, BS#3).

Добавить выбранные станции для расчета.

Поместить курсор в выбранную область и, нажав правую кнопку мыши, выполнить расчет для определения зоны наличия (отсутствия) связи.

Области разного цвета указывают на наличие связи в прямом, обратном направлениях, в обоих направлениях или отсутствие связи.

Обозначения цветов на карте (указано в левом нижнем углу проекта):

**NS** (No service) – отсутствие связи;

**FO** (Forward only) – связь в одном направлении от базовой станции к абоненту;

**RO** (Reverse only) – связь в одном направлении от абонента к базовой станции;

**FR** (Forward and Reverse) – связь в двух направлениях.

Оценить радиус зон наличия связи с использованием инструмента «выбор линии».

## 8. Расчет числа каналов БС.

Навести указатель мыши на участок между тремя БС и, нажав правую клавишу, выбрать «Расчет числа каналов БС». Параметры для расчета устанавливаются по варианту задания на лабораторную работу.

### **Задание на лабораторную работу**

1. Определить уровень сигнала (Трасса: Сектор#1, Принимающий сигнал, дБм) в двух различных местах (Абонент#1, Абонент#2), находящихся на расстоянии 35 км от BS#3, и сравнить его с чувствительностью приемника абонента (-100 дБм), дать рекомендации относительно выбора (замены) приемопередатчиков БС.

2. Выполнить расчет по п. 6.1 при наличии препятствия в виде горы (mountain) высотой 450 м, длиной и шириной 1000 м. Проанализировать рельеф местности (Трасса: Сектор#1, Принимающий сигнал, дБм). Для создания препятствия нажать левую клавишу мыши и выбрать «Новое препятствие».

3. Произвести вспомогательные расчеты потерь при распространении на расстоянии 35 км для различных типов местности (село, пригород, город, крупный город).

*Утилиты* → *Вспомогательные расчеты* → *COST 231 Hata*. Задаваемые параметры: высота антенны –  $h = (30 + N)$  м ( $N$  – номер варианта), расстояние 35 км. Остальные параметры – по умолчанию.

4. Определить зоны наличия (отсутствия) связи для трех заданных БС.

5. Произвести расчет числа каналов БС, если:

– удельная нагрузка от одного абонента, Эрл –  $A = 0,0N + 0,0P$ ;

– вероятность установления соединения –  $P = 0,9N$ ;

– соединение: БС с максимальным сигналом – для четных  $N$  и равновероятное – для нечетных  $N$ ;

– закон распределения абонентов: равномерный – для четных  $N$  и нормальный – для нечетных  $N$ .

Формула для расчета числа каналов: Эрланга В.

#### **Содержание отчета**

1. Титульный лист.

2. Цель работы и задание на лабораторную работу.

3. Результаты расчетов, полученные в пп. 1–5 задания на лабораторную работу.

4. Цифровая карта местности с размещенными на ней БС, препятствиями и абонентами.

5. Выводы по полученным данным расчетов.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение частотно-территориальному плану.

2. Что называется кластером?

3. Как влияет коэффициент повторного использования частот на емкость сети?
4. В чем отличие микросотовых сетей подвижной связи от макросотовых сетей?
5. Поясните процедуру «ведение абонента», «роуминг».
6. Поясните назначение центра коммутации.
7. Каково назначение интерфейсов в сетях сотовой связи?
8. Какая модель использовалась при расчете потерь мощности сигнала на трассе распространения?
9. Какова особенность антенн типа OMNI?
10. Каково максимальное расстояние, при котором еще имеет место уверенный прием сигнала в стандарте GSM-900?
11. Какие типы препятствий на трассе вызывают наибольшие потери мощности сигнала?
12. Какие параметры входят в модель Окамуры?

## 1.6. Лабораторная работа № 2 ИЗУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

*Цель работы:* размещение базовых станций на цифровой карте местности; расчет прямой видимости; вычисление уровня сигнала передатчика; нахождение потерь в атмосфере и на деревьях.

### *Краткие теоретические сведения*

#### **Модель свободного пространства**

Модель свободного пространства является эталонной при анализе распространения радиоволн на различных трассах. В рамках этой модели энергия сигнала зависит только от расстояния между передатчиком и приемником и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Суммарные потери  $L_p$  (снижение мощности сигнала) в свободном пространстве определяются формулой

$$L_p = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (1.9)$$

где  $\lambda$  – длина волны сигнала;  $d$  – расстояние между передатчиком и приемником, км.

Обычно величину потерь измеряют в децибелах. В свободном пространстве для идеальных антенн  $L_p$ , дБ:

$$L_p = 32,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d), \quad (1.10)$$

где  $f$  – частота сигнала, МГц.

Заметим, что при заданной несущей частоте сигнала  $f$  первое и второе слагаемые – константы, и  $L_p$  изменяется как логарифм расстояния. Модель свободного пространства основана на концепции расширяющегося сферического фронта волны при излучении сигнала от точечного источника в пространстве. Эта модель используется, в основном, в спутниковых системах связи дальнего космоса, где сигналы распространяются сквозь «свободное пространство». В системе мобильной связи появляются дополнительные потери из-за препятствий и другие помехи, поэтому необходимы более сложные модели, чтобы предсказать потери при распространении.

### **Модель Ли**

Распространение радиоволн в наземной связи сопровождается большими потерями, чем в свободном пространстве, поскольку имеются препятствия между передатчиком и приемником. В результате принятый сигнал складывается из сигналов, перемещающихся через прямые и не прямые пути. Это сигналы, перемещающиеся по линии прямой видимости, и сигналы, перемещающиеся по ломаной линии, которая формируется на основании рассеяния и отражения от объектов, находящихся между передатчиком и приемником (строения, деревья, холмы и др.). Именно поэтому потери на трассе в приземной области выше, чем в свободном пространстве, и степень потерь находится в более сильной зависимости от расстояния между передатчиком и приемником. Для иллюстрации приведем упрощенную формулу в модели Ли для частот, используемых в сотовой связи:

$$L_p = 1,14 \cdot 10^{13} \cdot \frac{d^{3,84}}{h^2}, \quad (1.11)$$

где  $h$  – высота антенны базовой станции, м.

Для расчета в децибелах формула имеет следующий вид:

$$L_p = 129,45 + 38,4 \lg(d) - 20 \lg(h). \quad (1.12)$$

Уточненная модель распространения радиоволн должна быть функцией различных параметров, необходимых для описания условий распространения. Рассмотренные ниже модели Walfish – Ikegami

и Okumura – Nata используют более сложные методы расчета потерь распространения, которые зависят от таких параметров, как частота, высоты антенн передатчика и приемника и плотность застройки, модели основаны на обширных эмпирических измерениях в городских условиях.

### Модель Уолфиша – Икегами

Модель Уолфиша – Икегами (Walfish – Ikegami) применяется для расчета уровня принятого сигнала в крупных и средних городах (рис. 1.5). Производится расчет уровня принятого сигнала на основе рекомендации COST 231. Реальный рельеф местности не учитывается, вместо этого в параметрах модели указывается тип городской застройки.

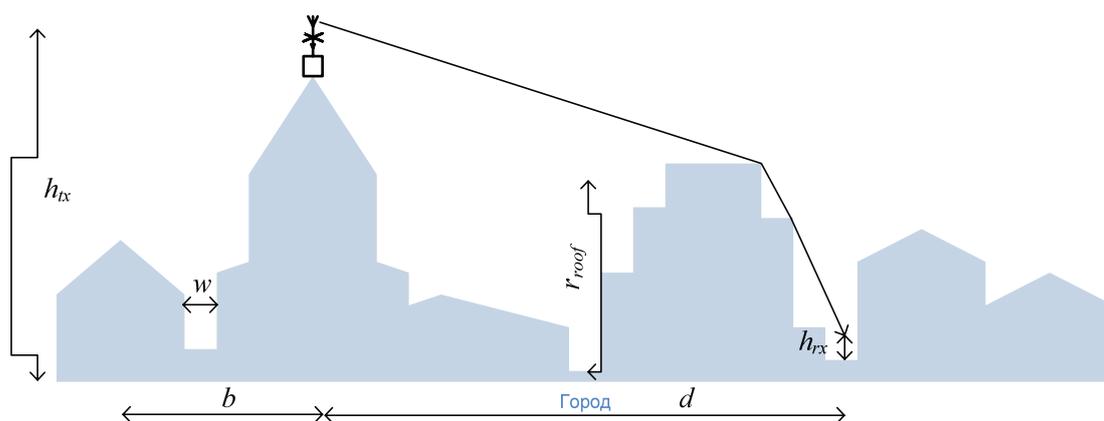


Рис. 1.5. Условная схема прохождения радиосигнала в районе с плотной застройкой

Модель испытана в диапазоне частот 900–1800 МГц на расстояниях от 100 м до 3 км. Обеспечивает хорошую точность предсказания при высоте антенны выше уровня крыш. Ошибки предсказания увеличиваются при высоте антенны близкой к уровню крыш. Модель не применима для открытых участков, где есть прямая видимость.

Ограничения модели:

- диапазон частот 800–2000 МГц;
- высота антенны базовой станции 4–50 м;
- высота антенны абонента 1–3 м;
- дальность 0,02–5 км.

В качестве исходных данных моделирования выступают:

- 1)  $h_{tx}$  – высота антенны базовой станции (м);
- 2)  $w$  – средняя ширина улиц (м);
- 3)  $b$  – среднее расстояние между домами (м);
- 4)  $h_{roof}$  – средняя высота зданий (м);

- 5)  $h_{rx}$  – высота антенны абонента (м);
- 6)  $\varphi$  – угол с улицей (град);
- 7)  $d$  – расстояние от абонента до базовой станции (км);
- 8)  $f$  – рабочая частота (МГц);
- 9) тип застройки: средняя или плотная.

В модели Walfish – Ikegami суммарная потеря сигнала складывается из трех слагаемых:

- 1)  $l_0$  – потери в свободном пространстве;
- 2)  $l_{rts}$  – потери, вызванные дифракцией на крышах;
- 3)  $l_{msd}$  – потери при многократном отражении.

$$L_p = \left\{ \begin{array}{l} l_0 + l_{rts} + l_{msd} \text{ при } l_{rts} + l_{msd} > 0, \\ l_0 \text{ при } l_{rts} + l_{msd} \leq 0. \end{array} \right\} \quad (1.13)$$

Потери в свободном пространстве:

$$l_0 = 32,44 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d). \quad (1.14)$$

Потери, вызванные дифракцией на крышах:

$$l_{rts} = -6,9 - 10 \lg(w) + 10 \lg(f) + 20 \lg(h_{roof} - h_{rx}) + l_{ori}, \quad (1.15)$$

где параметр  $l_{ori}$  учитывает величину угла относительно улицы.

Потери, вызванные многократным отражением:

$$l_{msd} = l_{bsh} + k_a + k_d \lg(d) + k_f \lg(f) - 9 \lg(b), \quad (1.16)$$

где параметры  $l_{bsh}$ ,  $k_a$  и  $k_d$  зависят от высот антенн базовой и абонентской станций и высоты зданий; коэффициент  $k_f$  учитывает тип застройки.

### Модель Окумура – Хата

Модель Окумура – Хата (Okumura – Hata) была разработана на основе данных измерений уровней сигнала от передатчика в нескольких частотных диапазонах в Токио и его пригородах. Выбор этого метода наиболее предпочтителен для урбанизированных областей, где расстояние анализа относительно невелико (меньше чем 30 км), эффективная высота передающей антенны – меньше чем 200 м, эффективная высота приемной антенны – меньше чем 10 м, и местность относительно плоская (рис. 1.6). Использование этого метода для других случаев или при больших расстояниях может оказаться неприемлемым. Применяя эту модель, можно выбирать типы наземных помех: «нет», «пригородная зона» или «город». Этот выбор определит соответствующее выражение для затухания, а реальный рельеф местности не учитывается. Модель применима только при высоте антенны базовой станции выше уровня крыши.

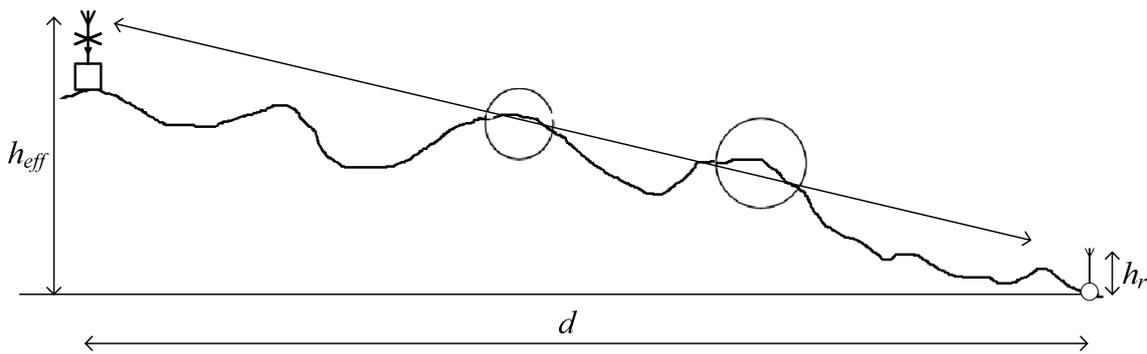


Рис. 1.6. Условная схема прохождения радиосигнала в районе с холмистой местностью

Ограничения модели:

- диапазон частот 150–2000 МГц;
- высота антенны базовой станции 30–200 м;
- высота антенны абонента 1–10 м;
- дальность 1–20 км.

В качестве исходных данных моделирования выступают:

- $h_{eff}$  – высота антенны базовой станции (м);
- $h_r$  – высота антенны абонента (м);
- $d$  – расстояние от абонента до базовой станции (км);
- $f$  – рабочая частота (МГц);
- тип застройки.

Основные потери на трассе для городских зон находятся по формуле

$$a = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_{eff}) - c(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{eff})) \lg(d), \quad (1.17)$$

где  $c(h_r)$  – поправочный коэффициент, учитывающий тип застройки.

Для пригородных областей городские потери корректируются следующим образом:

$$a_{\text{rural}} = a - 2 \left( \lg\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5,4. \quad (1.18)$$

Для сельских открытых участков

$$a_{\text{open}} = a - 4,78 (\lg(f))^2 + 18,33 \lg(f) - 40,94. \quad (1.19)$$

## Модель RPS

Производится расчет уровня принятого сигнала на основе детального анализа профиля земной поверхности между передатчиком и точкой приема. Расчет уровня принятого сигнала в каждой точке эквивалентен расчету для радиолинии, соединяющей базовую станцию с данной точкой. Учитываются потери в свободном пространстве, потери за счет отражения, дифракции на препятствиях, высота и диаграмма направленности антенны передатчика.

### Порядок выполнения работы

1. Запустить программу RPS-2, нажав левой кнопкой мыши на значок .

2. Выбрать на панели инструментов *Проект* → *Новый* и ввести имя, выбрать радио-стандарт – GSM.

3. Выбрать местоположения базовых станций (БС): нажав левую клавишу мыши, выбрать «Новое место».

4. Задать параметры БС: имя – BS#1, число секторов – 1, антенна – OMNI, поляризация – горизонтальная, приемопередатчик – BS, высота передающей антенны –  $h = 50$  м, поляризация – горизонтальная, фидеры – default. Мощность передатчика – 30 дБм. Координаты БС – из табл. 1.4.

Таблица 1.4

Координаты БС

| Наименование координат | Вариант     |             |             |             |             |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                        | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           |
| E                      | 82-56-22.58 | 82-58-57.43 | 82-55-30.17 | 82-58-57.43 | 82-54-21.08 |
| N                      | 55-5-50.75  | 55-5-13.18  | 55-3-40.60  | 55-3-51.33  | 55-2-30.83  |
| Наименование координат | Вариант     |             |             |             |             |
|                        | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          |
| E                      | 82-57-57.88 | 82-48-42.79 | 82-52-19.58 | 82-55-11.11 | 83-4-57.17  |
| N                      | 55-1-11.67  | 55-0-28.73  | 54-58-53.47 | 54-57-30.28 | 54-58-25.29 |

5. Определение зоны прямой видимости.

*Выполнить* → *Расчет прямой видимости* → *Расстояние* – 3 км → *OK*.

Наблюдать изменение зоны прямой видимости при высотах передающей антенны  $h = 30, 35, 40, 45$  м.

6. Расчет уровня сигнала передачи по модели Hata.

Установить мощность передатчика 40 дБм.

Нажать кнопку  и в открывшемся окне активировать легенду «Сигнал».

*Выполнить* → *Расчет покрытия* → *Модель Hata* → *Антенна – 50 м, Расстояние – 3 км, Тип застройки – городская* → *ОК*. С использованием инструмента «Выбор линии» определить размер зон с различным уровнем сигнала.

Изменять мощность передатчика через 5 дБм (35, 30, 25) и наблюдать изменение размера зон с различным уровнем сигнала. Данные свести в таблицу для графического отображения полученных результатов.

Для данной модели при мощности передатчика 30 дБм наблюдать изменение уровня сигнала, варьируя следующие параметры: высота антенны передатчика – 30, 35, 40, 45 м; тип застройки – плотная городская, пригород, сельская.

7. Расчет уровня сигнала передачи по модели Walfish – Ikegami.

Установить мощность передатчика 30 дБм.

*Выполнить* → *Расчет покрытия* → *Модель Walfish – Ikegami* → *Антенна – 50 м, Расстояние – 3 км, Уровень крыши – 15 м, Ширина улиц – 20 м, Расстояние между домами – 40 м, Тип застройки – средняя* → *ОК*.

Для данной модели при мощности передатчика 30 дБм наблюдать изменение размера зон с различным уровнем сигнала, варьируя следующие параметры: высота антенны передатчика – 30, 35, 40, 45 м; уровень крыш – 20, 30 м; тип застройки: плотная, либо средняя. Данные свести в таблицу для графического отображения полученных результатов.

7.1. Провести вспомогательные расчеты.

*Утилиты* → *Вспомогательные расчеты* → *COST 231 Walfish – Ikegami*.

Провести расчет потерь на расстоянии 3 км при высоте крыш 15 и 30 м для двух типов застройки. Данные свести в таблицу для графического отображения полученных результатов.

8. Расчет уровня сигнала передачи по модели RPS-2.

Установить мощность передатчика 30 дБм.

*Выполнить* → *Расчет покрытия* → *Модель RPS-2* → *Антенна – 50 м, Расстояние – 3 км* → *ОК*.

Для данной модели при мощности передатчика 30 дБм наблюдать изменение уровня сигнала, учитывая или нет следующие факторы:

дифракция, отражение, атмосферные влияния, потери на местности. Наблюдать изменение размера зон с различным уровнем сигнала. Данные свести в таблицу для графического отображения полученных результатов.

9. Вспомогательные расчеты.

*Утилиты* → *Вспомогательные расчеты* → *Потери в атмосфере:*

1) на соответствующих частотах при заданном расстоянии (табл. 1.5) и влажности  $10 \text{ г/м}^3$ ;

Таблица 1.5

**Диапазоны частот**

| Номер варианта | Расстояние, км | Частоты, МГц |     |      |      |      |
|----------------|----------------|--------------|-----|------|------|------|
| 1              | 5              | 450          | 900 | 1900 | 2400 | 5200 |
| 2              | 10             |              |     |      |      |      |
| 3              | 20             |              |     |      |      |      |
| 4              | 35             |              |     |      |      |      |

2) потери в атмосфере для соответствующих расстояний при заданной частоте (табл. 1.6) и влажности  $10 \text{ г/м}^3$ ;

Таблица 1.6

**Диапазон расстояний**

| Номер варианта | Частота, МГц | Расстояния, км |    |    |    |    |
|----------------|--------------|----------------|----|----|----|----|
| 1              | 450          | 5              | 10 | 20 | 35 | 50 |
| 2              | 900          |                |    |    |    |    |
| 3              | 1900         |                |    |    |    |    |
| 4              | 5200         |                |    |    |    |    |

3) потери на деревьях для различных высот деревьев на соответствующих частотах (табл. 1.7);

Таблица 1.7

**Высота деревьев**

| Номер варианта | Частота, МГц | Высота деревьев, м |   |    |    |    |
|----------------|--------------|--------------------|---|----|----|----|
| 1              | 450          | 2                  | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 2              | 900          |                    |   |    |    |    |
| 3              | 1900         |                    |   |    |    |    |
| 4              | 5200         |                    |   |    |    |    |

4) потери в атмосфере на соответствующих частотах при заданной высоте деревьев (табл. 1.8).

Таблица 1.8

**Диапазоны частот**

| Номер варианта | Высота деревьев, м | Частоты, МГц |     |      |      |      |
|----------------|--------------------|--------------|-----|------|------|------|
| 1              | 2                  | 450          | 900 | 1900 | 2400 | 5200 |
| 2              | 5                  |              |     |      |      |      |
| 3              | 10                 |              |     |      |      |      |
| 4              | 20                 |              |     |      |      |      |

По каждому из четырех пунктов вспомогательных расчетов полученные данные свести в таблицу для графического отображения результатов.

***Задание на лабораторную работу***

1. Провести расчеты по п. 5–9.
2. Провести графическую обработку полученных результатов с использованием Microsoft Office Excel.
3. Провести сравнительный анализ использованных в работе моделей по результатам расчетов.

***Содержание отчета***

1. Титульный лист.
2. Цель работы и задание на лабораторную работу.
3. Привести основные характеристики оборудования беспроводных сетей; факторы, приводящие к потерям в радиолинии; описание моделей распространения радиосигналов (RPS, Okamura – Naka (COST 231), Walfish – Ikegami).
4. Результаты расчетов.
5. Цифровая карта местности с размещенными на ней БС.
6. Выводы.

***Контрольные вопросы***

1. Какие факторы приводят к потерям при распространении радиоволн?
2. Поясните основные физические эффекты и изучаемые явления при распространении радиоволн: дифракция, отражение, преломление, рассеяние, замирание.

3. Для каких систем связи (наземных или спутниковых) поглощение мощности сигнала в атмосфере является наиболее существенным фактором?

4. Какие характеристики деревьев наиболее существенно влияют на затухание сигнала?

5. Дайте определение электромагнитной совместимости.

6. Дайте определение понятия «кластер сот». В чем преимущества и недостатки кластеризации сот?

7. С какой целью выполняется секторизация соты?

8. На каких частотах работают радиорелейные линии связи, и какие факторы в наибольшей степени влияют на устойчивость их функционирования?

9. Какой фактор является наиболее неблагоприятным фактором, вызывающим потери мощности сигнала в атмосфере на частотах свыше 1 ГГц?

10. Дайте классификацию основных типов помех в системах подвижной связи.

11. Какого типа помехи наиболее существенно ухудшают связь в диапазоне 800–900 МГц, и что является их источником?

### 1.7. Лабораторная работа № 3 ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАДИОСЕТЕЙ

*Цель работы:* выполнение расчетов, необходимых для оценки качества связи и зон обслуживания радиосети стандарта GSM и радиорелейной линии связи на основе реальных данных о рельефе местности с использованием RPS-2.

#### *Краткие теоретические сведения*

**Основные этапы частотно-территориального планирования (ЧТП) сетей подвижной радиосвязи** включают в себя следующие операции.

1. *Разработка требований к исходным данным.* В техническом задании на выполнение ЧТП должно быть указано:

– тип абонентов, работающих внутри и вне помещений (процентное соотношение);



- плотность абонентов на единицу площади или плотность трафика на единицу площади;
- потребность абонентов в скорости трафика (процентное соотношение);
- тип передаваемого трафика;
- тактико-технические параметры на оборудование базовых и абонентских станций;
- объем выделенного для развертывания сети радиочастотного ресурса;
- ограничения на высоты подвеса антенн (антенных мачт).

*2. Расчет бюджета канала связи.* На первом этапе частотно-территориального планирования сети беспроводного широкополосного доступа производится расчет бюджета канала связи для данного оборудования с целью определения максимально допустимых потерь в канале связи и первоначальной оценки радиуса зоны обслуживания. Расчет бюджета потерь проводится для двух направлений: линии вниз (downlink) и вверх (uplink), а в качестве результирующего значения выбирается минимальное из рассчитанных значений.

*3. Выбор структуры кластера сети.* В зависимости от объема радиочастотного ресурса, выделенного оператору сети беспроводного широкополосного доступа, возможны различные варианты построения топологии радиочастотного кластера.

*4. Расчет зоны покрытия по уровню принимаемого сигнала.* После того как требования к функционированию сети сформулированы, выбраны кластерная структура и первоначальный частотный план, происходит проверка возможности размещения сайтов на выбранных местах.

Далее с использованием специализированного программного обеспечения рассчитываются зоны радиопокрытия для направления передачи вниз (downlink) и вверх (uplink) отдельно.

В качестве инструмента прогнозирования потерь распространения радиоволн можно использовать различные статистические и квазидетерминистские математические модели распространения радиоволн. Наибольшее приближение результатов прогнозирования и измерений в застройке города Минска наблюдается при использовании дифракционных моделей P.526, SPM и WLL.

*5. Расчет внутрисистемных интерференций.* После расчета зоны покрытия по уровням принимаемого сигнала проводят анализ внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) для принятой структуры сети.

Провести анализ внутрисистемной электромагнитной совместимости сети можно двумя способами:

- рассчитать с использованием модели МСЭ-R Р.452 зоны помех от базовых станций базовым станциям, на которых назначены те же рабочие частоты; провести те же вычисления, только за источник помех принять абонентские станции, а за рецептор помех – базовые станции;

- рассчитать с использованием специализированного программного обеспечения зоны покрытия по уровням  $C/(I+N)$  – «сигнал/помеха» для направлений передачи downlink и uplink.

*6. Планирование зон хэндовера.* Работа мобильной широкополосной сети при перемещении абонентов из зоны покрытия одной базовой станции в другую обязательно предусматривает выполнение процедуры хэндовера.

Для четкой отработки процедуры хэндовера необходимо выполнить планирование зон хэндовера между зонами покрытия соседних секторов (сайтов). Планирование в данном случае заключается в уменьшении излишнего перекрытия соседних зон покрытия при сохранении формы зоны радиопокрытия отдельных секторов.

*7. Расчет качественных показателей покрытия сетей подвижной радиосвязи.* На заключительном этапе планирования сети подвижной радиосвязи производится расчет ее качественных параметров функционирования и представляется в виде карты покрытия, наложенной на зону обслуживания по выбранному критерию.

К основным показателям качества работы мобильной беспроводной сети относятся: скорость передачи данных и коэффициент битовой ошибки (каждый из параметров рассчитывается отдельно для направлений downlink и uplink).

Стандарт GSM тесно связан со всеми современными стандартами цифровых сетей, в первую очередь с ISDN и IN. Основные функциональные элементы GSM входят в международный стандарт глобальной системы подвижной связи UMTS.

Система GSM является цифровой системой передачи данных, речь кодируется и передается в виде цифрового потока.

*Основные характеристики радиointерфейса GSM-900:*

- полосы частот: 890–915 МГц – линия вверх (MS передача), 935–960 МГц – линия вниз (MS прием);
- полоса радиоканала: 200 кГц;
- каналы/несущая: 8;
- множественный доступ: TDMA/FDMA;
- дуплекс: FDD;

- скорость передачи в радиоканале: 270,833 кбит/с;
- модуляция: GMSK;
- спектральная эффективность: 1,35 бит/с/Гц.

*Радиопараметры GSM-900. Мобильная станция (MS):*

- чувствительность: –104 (–102) дБм. Типичная чувствительность: –106 дБм;
- максимальная выходная мощность: 33 (30) дБм.

*Базовая станция (BS):*

- чувствительность: –104 (–104) дБм. Типичная чувствительность: –107 дБм.
- максимальная выходная мощность: 43 дБм.

*Каналы в GSM-900 представлены на рис. 1.7.*

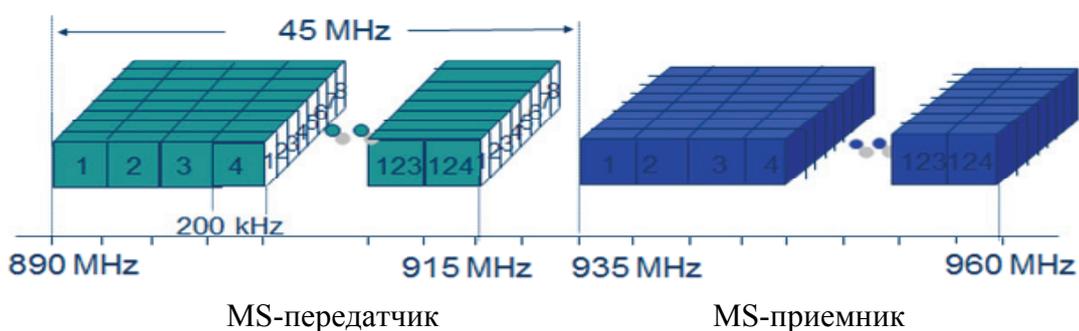


Рис. 1.7. Каналы GSM-900

### Расчет основных параметров сотовой системы связи

Общее число частотных каналов, выделенных для развертывания сотовой сети связи в данном месте, определяется по формуле

$$N_k = \text{int} \left( \frac{\Delta F}{F_k} \right), \quad (1.20)$$

где  $\text{int}(X)$  – целая часть числа  $X$ ;  $\Delta F$  – полоса частот, выделенная оператору связи;  $F_k = 200$  кГц – полоса частот, занятая одним частотным каналом системы сотовой связи – частотный разнос между каналами.

**Выбор типа кластера.** Главным критерием при выборе кластера является выполнение требований по допустимому отношению сигнал/помеха ( $S/N_I$ ) в точке приема, прежде всего в основном канале. Здесь рассматриваются лишь внутрисистемные помехи. Величина ( $S/N_I$ ) (защитное или пороговое отношение сигнал/помеха), как правило, известна и, например, для цифровых сотовых систем стандарта GSM равна 9 дБ.

Для выбора кластера необходимо также задать требования к вероятности события  $P(C)$ , когда отношение сигнал/помеха в точке приема окажется ниже порогового. Эта величина оценивает устойчивость связи при перемещении подвижного абонента в зоне обслуживания сети. Обычно эту вероятность задают на уровне 0,1–0,15.

Внутрисистемные помехи в сотовой архитектуре сети подвижной связи создают, прежде всего, БС соседних кластеров, которые работают на повторяющихся частотах. В кластерах с несекторизованными сотами таких близкорасположенных базовых станций, создающих помехи по основному каналу, будет шесть. В кластерах с трех- и шести-секторными сотами – две и одна помеха соответственно. Уровень помех зависит от размерности кластера  $C$ , радиуса сот  $R_0$  и расстояния между сотами с повторяющимися частотами  $D$  и связан с защитным соотношением  $q = D / R_0 \approx \sqrt{3C}$ . Полагая, что в большинстве случаев затухание сигнала (помехи) в системах подвижной связи обратно пропорционально  $d^4$ , где  $d$  – расстояние от источника сигнала (помехи), можно оценить относительный уровень помех  $\beta$  по основному каналу приема для абонентских станций, находящихся на границах сот, который составляет для сот с ненаправленной антенной ( $M = 1$ )

$$\beta_1 = \beta_2 = (q - 1)^{-4}, \beta_3 = \beta_4 = q^{-4}, \beta_5 = \beta_6 = (q + 1)^{-4},$$

а для сот с направленными антеннами:

- при  $M = 3 \beta_1 = (q + 0,7)^{-4}, \beta_2 = q^{-4}$ ;
- при  $M = 6 \beta_1 = (q + 1)^{-4}$ .

В универсальной модели однородной сети регулярной структуры зона обслуживания каждого передатчика находится в окружении 18 соканальных помех (рис. 1.8), расположенных в углах трех правильных шестиугольников с координационными расстояниями  $D_{k1}, \sqrt{3}D_{k1}, 2D_{k1}$  соответственно.

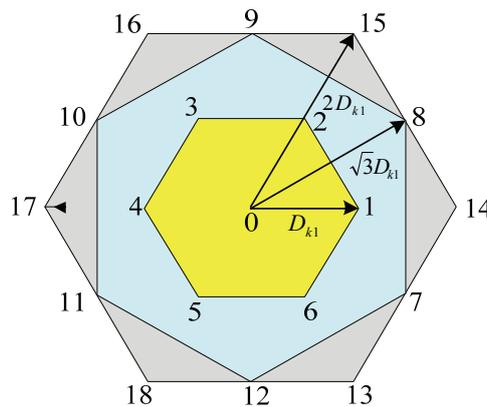


Рис. 1.8. Расположение помех совмещенного канала

В сотовых сетях связи для определения мощностей сигнала и помех на входе приемника абонентского терминала для предсказания потерь при распространении сигнала используется модель Окамура – Хата. В соответствии с этой моделью мощность сигнала на входе приемника  $P_{\text{пр}}$  абонентской станции, находящейся на расстоянии  $R$  от передатчика, равна

$$P_{\text{пр}}(R) = P_{\text{изл}}(\Theta) \cdot L(R), \quad (1.21)$$

где  $P_{\text{изл}}(\Theta)$  – излучаемая мощность передатчика в зависимости от направления на абонентскую станцию; при этом предполагается, что антенна абонентской станции имеет круговую диаграмму направленности;  $L(R)$  – потери (величина, обратная затуханию) сигнала при распространении в городских районах, зависит от высоты передающей и принимающей антенн, расстояния между ними, несущей частоты, эмпирического коэффициента.

Мощность сигнала на входе приемника обратно пропорциональна расстоянию до передатчика:

$$P_{\text{пр}}(R) = \frac{P_{\text{изл}}(\theta)}{B \cdot R^x}, \quad (1.22)$$

где  $B$  – коэффициент, рассчитанный эмпирически и зависящий от высоты передающей и принимающей антенн, несущей частоты;  $x$  – показатель степени при  $R$ :

$$x = 4,49 - 0,655 \lg(h_{\text{бс}}).$$

Мощность интерференционных помех, создаваемых шестью мешающими передатчиками первого шестиугольника, равна

$$P_{\text{п1}} = 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}(\theta)}{B \cdot (R_3)^x} \cdot \frac{1}{(\sqrt{27})^x} \quad (1.23)$$

По аналогии с (1.30) получают формулу мощности интерференционных помех, создаваемых шестью мешающими передатчиками второго шестиугольника:

$$P_{\text{п2}} = 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}(\theta)}{B \cdot (R_3)^x} \cdot \frac{1}{9^x} \quad (1.24)$$

и третьего шестиугольника:

$$P_{\text{п3}} = 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}(\theta)}{B \cdot (R_3)^x} \cdot \frac{1}{(\sqrt{108})^x}. \quad (1.25)$$

При работе в сотовой сети появляются интерференционные помехи от передатчиков БС, работающих на совпадающих частотах (в совмещенных каналах), и в результате на входе приемника необходимо рассматривать отношение сигнал/(шум + интерференционная помеха):

$$h_{\Sigma} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}} + P_{\text{пом}\Sigma}}. \quad (1.26)$$

Вероятность невыполнения требований по допустимому отношению сигнал/помеха ( $S/N_f$ ) в точке приема  $P(C)$  зависит от размерности кластера. Вероятность  $P(C)$  убывает с ростом размерности кластера. При этом одновременно падает частотная эффективность сети. Оцениваются различные варианты кластеров и выбирается оптимальный. Результаты оценки различных вариантов кластеров для стандарта GSM-900 приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Оценка кластеров для сети стандарта GSM-900

| Размерность кластера<br>$C$ | Параметры  | Секторность $M$ |      |    |     |      |      |      |     |      |
|-----------------------------|------------|-----------------|------|----|-----|------|------|------|-----|------|
|                             |            | 1               |      |    | 3   |      |      | 6    |     |      |
| 3                           | $P(C)$ , % | –               | –    | –  | 6,2 | 21,8 | 29,5 | 0,4  | 6,6 | 14,5 |
| 4                           | $P(C)$ , % | 39              | 49,6 | –  | 2,3 | 14,7 | 23,6 | 0,3  | 4,3 | 11,5 |
| 7                           | $P(C)$ , % | 6,4             | 25,8 | 35 | 0,2 | 6,4  | 15,2 | 0,01 | 1,7 | 6,8  |

**Определение пространственных параметров сети.** Исходными параметрами для расчета пространственных параметров сети являются:

- площадь зоны обслуживания  $S$ ;
- число абонентов в зоне обслуживания  $N_a$ ;
- число рабочих частот, выделенных оператору;
- число каналов, приходящихся на одну несущую (для стандарта GSM-900  $n = 8$ );
- число каналов, используемых для управления и сигнализации;
- допустимая вероятность блокировки вызова в час «пик» (отказа в обслуживании)  $P_a$ ;
- активность абонента в час наибольшей нагрузки  $A$  (в соответствии с требованиями  $A_{\text{ср}} = 0,03\text{--}0,05$  Эрл).

Определение пространственных параметров сети для выбранного типа кластера при фиксированном числе трафиковых каналов  $N_n$ , приходящихся на соту (ячейку), связано с допустимой телефонной нагрузкой на ячейку  $A_c$  при заданной вероятности отказа

в обслуживании (блокировки вызова  $P_a$ ), которая рассчитывается по формуле Эрланга:

$$P_a = \frac{A_c^{N_n} / N_n!}{\sum_{i=0}^{N_n} (A_c^i / i!)} \quad (1.27)$$

Величина допустимой телефонной нагрузки в одном секторе одной соты (Эрл) определяется приближенным соотношением

$$A_c = n_0 \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( P_a \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right], \quad (1.28)$$

при условии, что вероятность блокирования вызова не превышает величины

$$P_a \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} = \sqrt{\frac{2}{8\pi}} = 0,282, \quad (1.29)$$

где  $n_0 = n_s n_a$  ( $n_s$  – число частотных каналов в секторе,  $n_a$  – число абонентов, которые могут одновременно использовать один частотный радиоканал. В данном случае  $n_a = 8$ , т. к. используется цифровой стандарт GSM).

Общее число каналов для каждого сектора или зоны обслуживания включает, помимо трафиковых, каналы управления и сигнализации.

После определения величины  $A_c$  находятся искомые параметры:

– число абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией в час наибольшей нагрузки:

$$N_{\text{БС}} = M \operatorname{int}\left(\frac{A_c}{A_{\text{ср}}}\right); \quad (1.30)$$

– число базовых станций в сети:

$$K = \operatorname{int}\left(\frac{N_a}{N_{\text{БС}}}\right); \quad (1.31)$$

– радиус соты:

$$R_0 = \sqrt{\frac{1,21S}{\pi K}}. \quad (1.32)$$

Коэффициент 1,21 учитывает отличие формы соты от окружности.

На этом этапе построения начального приближения сети появляется возможность уменьшить число базовых станций в составе сети за счет некоторого снижения ее частотной эффективности; в противном случае может возникнуть вопрос о необходимости расщепления сот для обеспечения заданного уровня обслуживания в районах повышенного трафика. Тогда необходимо выделить зону повышенной плотности трафика и определить размеры сот отдельно для данной зоны.

Число частотных каналов, которые используются для обслуживания абонентов в одном секторе соты, определяется по формуле

$$n_S = \text{int} \left( \frac{N_k}{CM} \right). \quad (1.33)$$

**Определение параметров базовых станций.** При определении параметров базовых станций сети (мощности передатчиков  $P_{\text{БС}}$  (дБВт) и высот антенн  $h_{\text{БС}}$ ) необходимо использовать технические данные радиооборудования сети, в частности, чувствительности приемников мобильных станций  $P_{\text{МС}}$  (дБВт), высоты их антенн  $h_{\text{МС}}$ , коэффициенты усиления антенных устройств базовых станций  $G_{\text{БС}}$  и сведения о морфоструктуре местности.

Необходимую мощность на выходе передатчика БС  $P_{\text{БС}}$  (дБВт) при распространении радиоволн в открытом пространстве определяют в зависимости от характера местности, пользуясь основным уравнением связи:

$$P_{\text{БС}} = P_{\text{МС}} - G_{\text{БС}} - G_{\text{МС}} + L + \alpha_f, \quad (1.34)$$

где  $G_{\text{БС}} = 0$  дБ;  $G_{\text{МС}} = 0,5$  дБ – коэффициенты усиления антенны БС и МС;  $L$  – затухание на трассе распространения с учетом всех добавок;  $P_{\text{МС}} = -110$  дБВт – чувствительность приемника МС;  $\alpha_f$  – потери в фидере БС.

### **Порядок выполнения работы**

1. Запустить программу RPS-2, нажав левой кнопкой мыши на значок .

2. Выбрать на панели инструментов: *Проект* → *Новый* и ввести имя, выбрать радио-стандарт – GSM. Установить число частот групп – 3.

3. Выбрать местоположения базовых станций (БС): нажав левую клавишу мыши, выбрать «Новое место».



4. Задать параметры БС: имя – BS#1, BS#2, BS#3, число секторов – 3, антенна – Ant001, поляризация – горизонтальная, приемопередатчик – BS, высота антенны –  $h = (30 + N)$  м, фидеры – default. Каждому сектору антенны установить соответствующую частотную группу. Координаты БС приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Координаты БС

| БС |   | Вариант     |             |             |             |             |
|----|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|    |   | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           |
| 1  | E | 82-56-36.88 | 82-56-55.93 | 82-57-0.70  | 82-56-41.64 | 82-56-17.82 |
|    | N | 55-3-23.16  | 55-3-27.18  | 55-3-15.11  | 55-3-9.74   | 55-3-15.11  |
| 2  | E | 82-52-12.44 | 82-52-31.50 | 82-52-29.11 | 82-52-7.67  | 82-51-46.23 |
|    | N | 54-59-12.25 | 54-59-12.25 | 54-59-2.86  | 54-58-58.84 | 54-59-4.20  |
| 3  | E | 82-47-48.00 | 82-48-7.06  | 82-48-2.29  | 82-47-36.09 | 82-47-26.56 |
|    | N | 55-1-55.95  | 55-1-54.60  | 55-1-42.53  | 55-1-42.53  | 55-1-53.26  |
| БС |   | Вариант     |             |             |             |             |
|    |   | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          |
| 1  | E | 82-56-8.29  | 82-56-29.73 | 82-57-17.38 | 82-57-22.14 | 82-57-5.46  |
|    | N | 55-3-25.84  | 55-3-36.58  | 55-3-24.50  | 55-3-12.42  | 55-2-59.01  |
| 2  | E | 82-51-46.23 | 82-51-58.14 | 82-52-52.94 | 82-52-45.79 | 82-52-26.73 |
|    | N | 54-59-17.62 | 54-59-28.35 | 54-59-4.20  | 54-58-53.47 | 54-58-49.44 |
| 3  | E | 82-47-24.17 | 82-47-45.62 | 82-48-26.12 | 82-48-18.97 | 82-47-48.00 |
|    | N | 55-2-4.00   | 55-2-9.36   | 55-1-46.55  | 55-1-34.48  | 55-1-33.14  |

#### 4.1. Расчет зон прямой видимости.

*Выполнить* → *Расчет прямой видимости* (BS#1, BS#2, BS#3) → *Расстояние – 6 км* → *ОК*.

Провести анализ рельефа местности в зонах непрямой видимости, а также изменения зоны прямой видимости в зависимости от высоты антенны БС.

#### 4.2. Расчет покрытия.

*Выполнить* → *Расчет покрытия* → *Модель RPS* (BS#1, BS#2, BS#3) → *Расстояние – 6 км* → *ОК*.

Для проведения дальнейших расчетов для трех заданных БС необходимо выделить три БС с помощью прямоугольника.

*Просмотр* → *Выбор прямоугольника*. Выделить область так, чтобы в нее попали три БС. Поместить курсор в выделенную область, нажать на левую клавишу мыши и присвоить имя области. Добавить БС выделенную область для последующих расчетов. Далее провести расчеты покрытия для каждой из трех БС.

#### 4.3. Определение зоны перекрытия сигнала:

- курсор мыши установить на выделенную область;
- нажать правую клавишу мыши;
- выбрать: *Прямой канал* → *Зоны перекрытия сигнала*;
- нажать левую клавишу мыши.

#### 4.4. Определение зон обслуживания:

- курсор мыши установить на выделенную область;
- нажать правую клавишу мыши;
- выбрать: *Прямой канал* → *Зоны обслуживания*;
- нажать левую клавишу мыши.

#### 4.5. Расчет мощности передачи абонента:

- курсор мыши установить на выделенную область;
- нажать правую клавишу мыши;
- выбрать: *Обратный канал* → *Необходимая мощность абонента*;
- нажать левую клавишу мыши.

#### 4.6. Расчет числа частотных каналов, необходимых для построения сети:

- курсор мыши установить на выделенную область;
- нажать правую клавишу мыши;
- выбрать: *Расчет числа каналов БС*. Установить число обслуживаемых системой абонентов –  $N \times 1000$ , удельная нагрузка от одного абонента –  $A = (0,03 + 0,01N)$  Эрл, закон – нормальный для четных  $N$  и равномерный – для нечетных  $N$  → *ОК*.

#### 4.7. Расчет отношения сигнал/помеха:

- курсор мыши установить на выделенную область;
- нажать правую клавишу мыши;
- выбрать: *Прямой канал* → *Сигнал/Шум + Помеха*;
- нажать левую клавишу мыши.

#### 4.8. Расчет электромагнитной совместимости.

*Выполнить* → *Расчет ЭМС* → *выбрать для расчета имеющиеся передатчики и приемники* → *ОК*. Провести анализ полученных результатов расчета и дать рекомендации по уменьшению уровня помех мешающих передатчиков.

#### 4.9. Расчет параметров радиолинии.

Для проведения расчетов радиолинии создать новый проект:

- выбрать на панели инструментов: *Проект* → *Новый* → *Ввести имя* → *Сеть по умолчанию* → *Релейная* → *ОК*;
- выбрать местоположения станций 1 и 2: нажать левую клавишу мыши, выбрать «*Новое место*»;



– задать параметры станций: имя – Станция#1, Станция#2. Число секторов – 1, антенна – Ant001, поляризация – горизонтальная, приемопередатчик – BS, высота антенны –  $h = (30 + N)$  м, фидеры – default. Координаты станций взять из табл. 1.10 для BS#1, BS#2. Параметры изображения значка выбрать «Directional»;

– выбрать местоположение мешающей станции 3. Задать параметры станций: имя – Станция#3, антенна – OMNI, поляризация – горизонтальная, приемопередатчик – BS, высота антенны –  $h = (30 + N)$  м, фидеры – default;

– выполнить соединение станций 1 и 2;

– провести взаимную ориентацию антенн станций: установить курсор на линию соединения станций, нажать правую кнопку, *Выбрать* → *Оптимальная ориентация* → *Обе*. Нажать левую кнопку.

– выполнить расчеты: профиль линии, потери прямой радиотрассы, потери обратной радиотрассы, расчет надежности, дальние помехи, расчет ЭМС.

### ***Задание на лабораторную работу***

1. Разместить базовые станции на цифровой карте в соответствии с вариантом задания.

2. Выполнить расчеты согласно п. 4.1–4.7 для трех заданных БС.

3. Выполнить п. 4.6 при количестве секторов антенны, равном 6.

4. Разместить станции на цифровой карте для создания радиорелейной линии и провести расчеты для радиотрассы.

#### ***Содержание отчета***

1. Титульный лист.

2. Цель работы и задание на лабораторную работу.

3. Цифровые карты местности с размещенными на ней станциями.

4. Результаты расчетов.

5. Выводы по полученным данным расчетов.

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение мощности сигнала на входе приемника.

2. Как определяется мощность интерференционных помех, создаваемых шестью мешающими передатчиками совмещенного канала, расположенными в первом шестиугольнике?

3. Дайте определение отношения сигнал/(шум + интерференционная помеха).

4. Как определяется полоса, занимаемая каналом при  $M$ -позиционной модуляции, если известна его полоса при  $M = 2$ ?
5. Как определяется суммарное число каналов в сети радиосвязи с FDMA для заданной полосы частот?
6. Как определяется число каналов, доступных на одной базовой станции в сети радиосвязи с FDMA?
7. Поясните причину уменьшения необходимой размерности кластера при переходе на базовых станциях от круговых антенн к секторным.
8. Как определяется количество абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией, при круговых антеннах?
9. Как определяется количество абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией, при секторных антеннах с числом наборов частот на базовой станции, равном числу секторов?
10. Как определяется количество абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией, при секторных антеннах с числом наборов частот на базовой станции, меньшем числа секторов?
11. Поясните, почему при шестисекторных антеннах на базовых станциях переход от шести наборов частот к двум наборам позволяет увеличить количество абонентов, обслуживаемых базовой станцией.

# 2

## РАБОТА В СРЕДЕ MATLAB И ПАКЕТЕ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ SIMULINK

### 2.1. Интерфейс среды MATLAB

Система MATLAB является интерактивной системой для выполнения инженерных и научных расчетов, ориентированной на работу с массивами данных. Система использует математический сопроцессор и допускает возможность обращения к программам, написанным на языках Fortran, C и C++.

Система MATLAB имеет собственный язык программирования, напоминающий BASIC, а также располагает большими возможностями для работы с сигналами, для расчета и проектирования систем связи, цифровых и аналоговых фильтров, различных вычислительных систем. Имеются в наличии и средства для спектрального анализа и синтеза, быстрого преобразования Фурье (БПФ), обработки изображений, Wavelet-анализа. Кроме этого, пользователь может ввести в систему любую новую встроенную команду, оператор или функцию.

Программный продукт MATLAB располагает большой библиотекой готовых функций, реализующих наиболее распространенные в научном мире методы вычислений. Для облегчения поиска функции разбиты на разделы. Наиболее общие функции включены в ядро системы MATLAB. Функции, которые являются специфическими для конкретной области, включены в состав соответствующих специализированных разделов. Эти разделы называются *Toolboxes* (Инструментальные приложения – ИП). Каждое из инструментальных приложений имеет свое название, отражающее его предназначение. Функции из любого ИП могут быть использованы в интерактивном режиме работы в качестве команд с параметрами.

При помощи командного окна можно осуществлять все вычисления в режиме калькулятора. При этом можно осуществлять присвоения

различным переменным конкретных значений и далее пользоваться ими в командном окне.

Программирование в среде MATLAB осуществляется путем создания М-файлов с расширением m (рис. 2.1). Недостатком является отсутствие оператора безусловного перехода GO TO, однако это можно полностью возместить путем структурного программирования с обращением к различным функциям и процедурам.

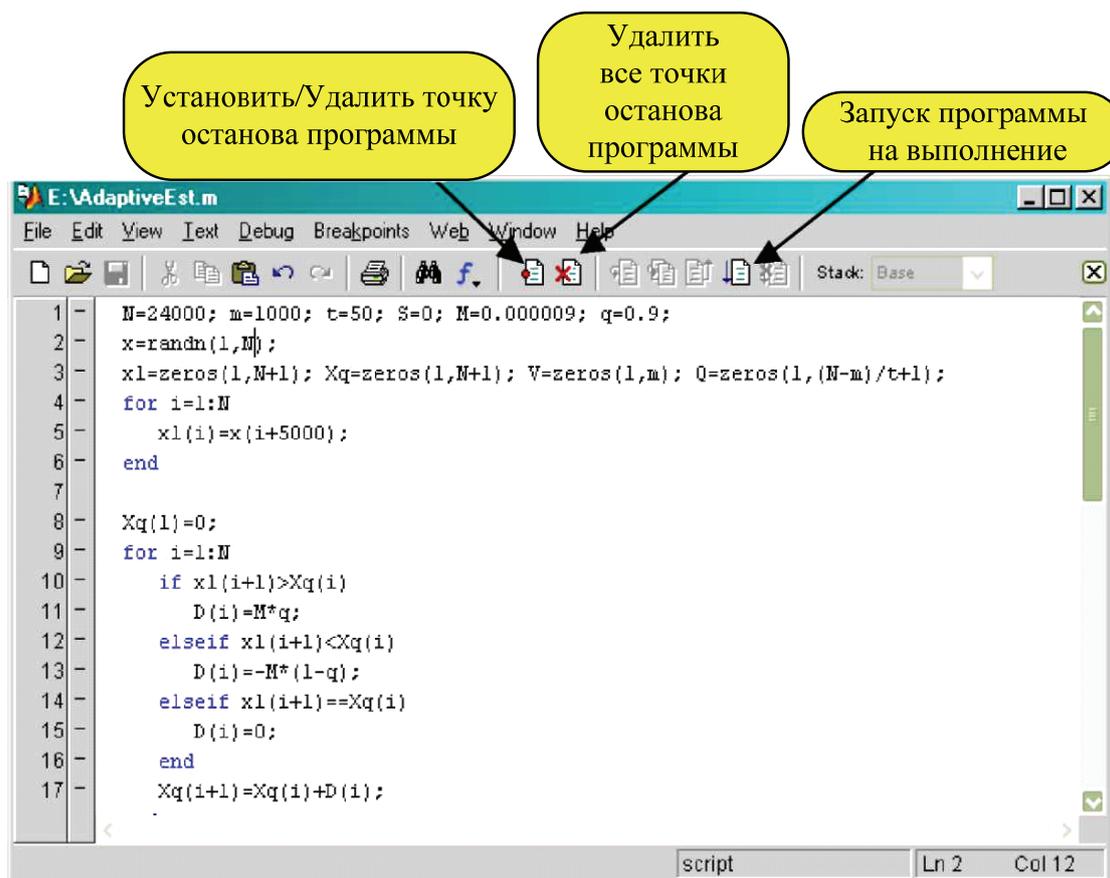


Рис. 2.1. Окно М-файла

Важным программным приложением системы MATLAB является ИП Simulink (рис. 2.2) – средство визуального моделирования динамических систем. В определенном смысле Simulink можно рассматривать как самостоятельный продукт фирмы The MathWorks Inc., однако он работает только при наличии ядра системы и использует функции, входящие в его состав.

Разработка моделей средствами Simulink (в дальнейшем S-модели) основано на использовании технологии Drag-and-Drop (Перетаски

и Оставь). В качестве «кирпичиков» для построения S-модели используют блоки, хранящиеся в библиотеке Simulink. Блоки могут быть связаны друг с другом как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и логики работы модели. Данные, которыми обмениваются блоки, могут быть скалярными величинами, векторами или матрицами произвольной размерности.

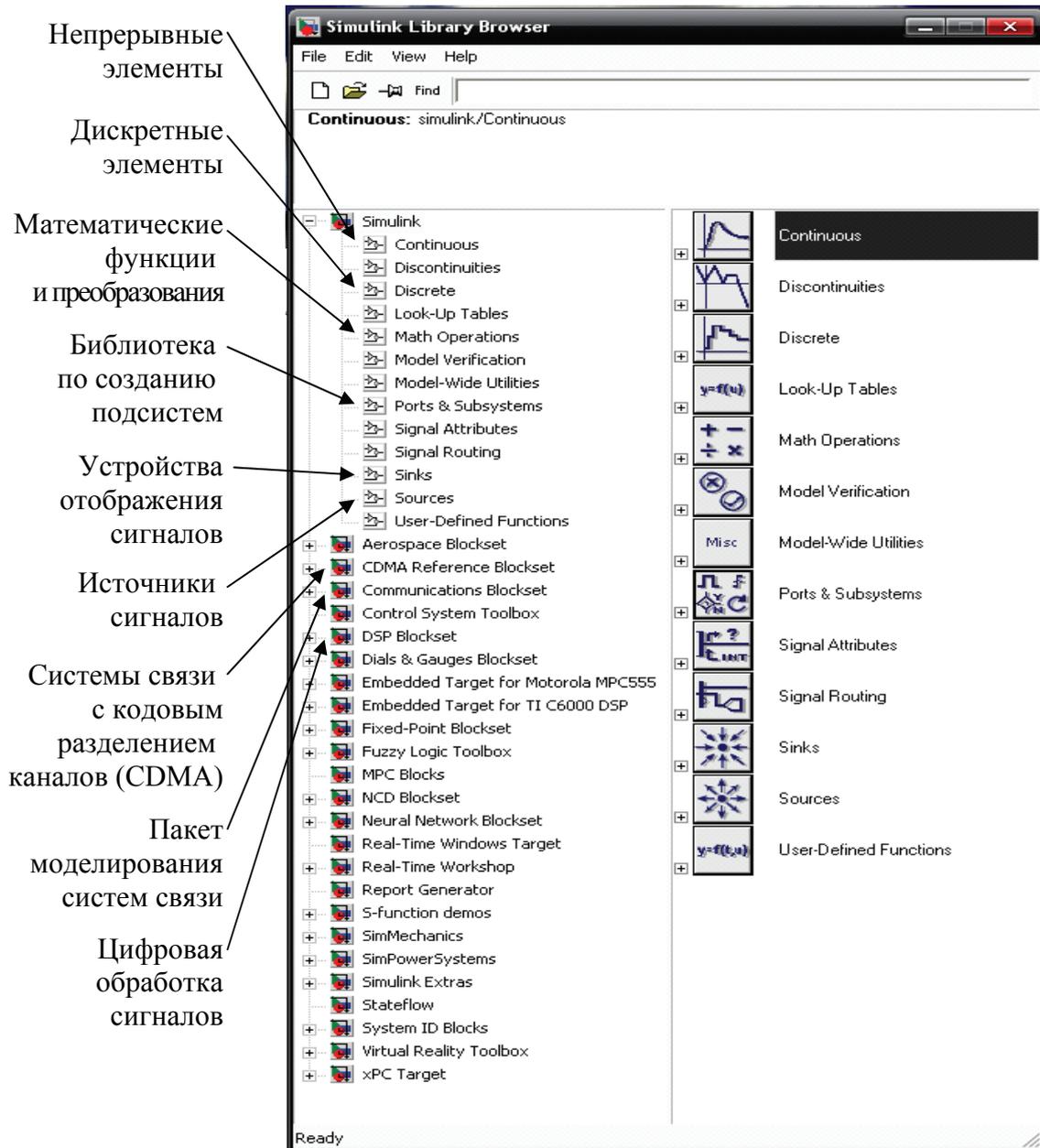


Рис. 2.2. Окно просмотра библиотек ИП Simulink (Simulink Library Browser)

Любая модель может иметь иерархическую структуру, т. е. состоять из моделей более низкого уровня, причем число уровней иерархии практически не ограничено.

В ходе моделирования можно наблюдать за процессами, происходящими в системе через специальные «смотровые окна», входящие в состав библиотеки Simulink.

Пакет Simulink позволяет осуществлять моделирование поведения динамических нелинейных систем. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя и по существу является типичным средством визуального объектно-ориентированного программирования. Используя палитры компонентов (наборы), пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки с палитр на рабочий стол пакета Simulink и соединяет линиями входы и выходы блоков.

Таким образом, создается блок-схема системы или устройства, т. е. модель, которая хранится в файле с расширением \*.mdl.

## 2.2. Моделирование динамических систем с использованием инструментального приложения Simulink

*Порядок создания новой модели:*

1. Запустить систему MATLAB.

После запуска системы MATLAB на дисплее компьютера появляется главное окно (рис. 2.3), содержащее панель меню и панель инструментов.

Главное меню по форме такое же, как и меню пользователя любого Windows-приложения.

Ниже расположена панель инструментов, обеспечивающая быстрый доступ к наиболее часто используемым командам из разделов меню.

После запуска MATLAB в клиентской области командного окна появляется знак приглашения ">", после которого можно вводить команды MATLAB.

2. Запустить ИП Simulink. Для этого можно воспользоваться двумя путями:

– ввести с помощью клавиатуры в командном окне системы (после значка приглашения ">") следующий текст: » simulink и нажать клавишу «Enter»;



– щелкнуть левой клавишей мыши (ЛКМ) на пиктограмме New Simulink Model, находящейся на панели инструментов.

После запуска ИП Simulink на дисплее компьютера появляется окно просмотра библиотек – Simulink Library Browser (рис. 2.2).

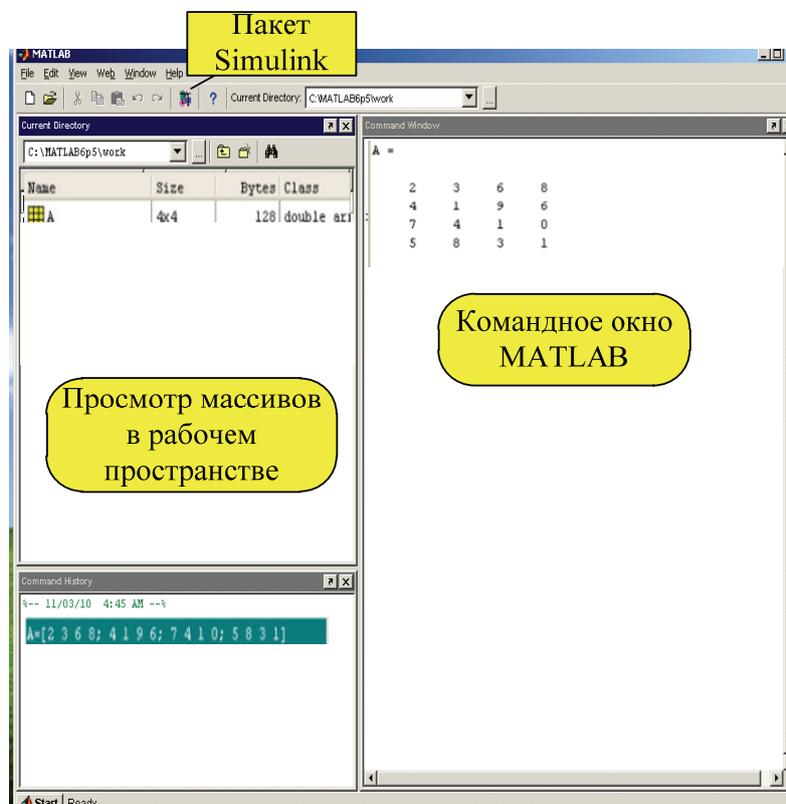


Рис. 2.3. Главное окно MATLAB

Для открытия раздела библиотек нужно щелкнуть ЛКМ на значке  либо дважды щелкнуть на самом разделе.

Разделы библиотеки содержат подразделы, а те, в свою очередь, – блоки – основную структурную единицу моделей.

3. Используя меню пользователя окна Simulink Library Browser, открыть окно новой модели (рис. 2.4). Окно новой модели по умолчанию имеет имя untitled (безымянный), которое может быть изменено при записи файла модели на диск.

Окно содержит панель меню пользователя, панель инструментов и строку состояния.

Меню пользователя содержит четыре основных раздела:

- **File** (команды работы с файлами и опции настройки печати);
- **Edit** (команды редактирования модели);

- **Simulation** (команды управления моделированием);
- **Format** (команды изменения оформления модели и ее отображения в окне).

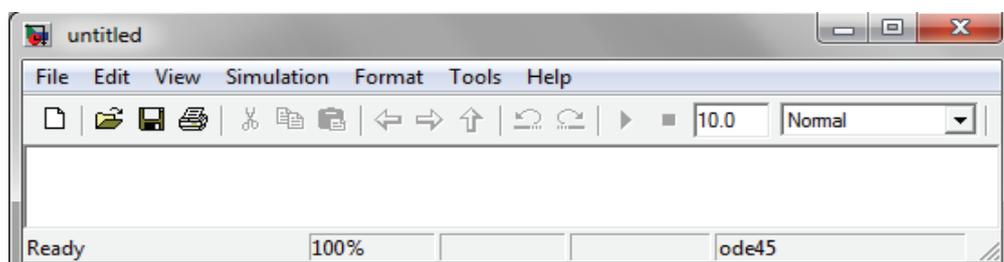


Рис. 2.4. Окно новой модели

4. Создать новую модель. Для этого открыть требуемый раздел библиотеки, выбрать необходимый блок, нажать ЛКМ и, не отпуская ее, перетащить выбранный блок в окно модели.

Аналогичным образом перетащить все необходимые для создания модели блоки.

Соединить входы и выходы блоков в соответствии с их назначением и логикой работы модели.

Для соединения блоков на их изображениях имеются значки входных и выходных портов.

Чтобы соединить два блока, нужно установить курсор на выходной порт одного блока (курсor примет форму крестика), нажать ЛКМ и, не отпуская ее, протянуть линию до входного порта другого блока. Отпустить ЛКМ. При соединении блоков значки портов исчезнут.

Чтобы подсоединить связь к уже существующей линии, нужно: установить курсор на линию, нажать правую клавишу мыши (ПКМ), протянуть линию к нужному входному порту, отпустить ПКМ.

После соединения блоков необходимо установить их параметры. Для этого двойным щелчком ЛКМ на изображении блока открыть окно установки параметров блока и указать необходимые параметры.

Окно установки параметров блока состоит из области описания блока, одной или нескольких строк установки параметров блока и управляющих кнопок: *Ok* (применить установленные параметры и закрыть окно установки), *Cancel* (отменить), *Help* (вызвать файл справки), *Apply* (применить установленные параметры).

Перед запуском модели на выполнение нужно сохранить файл созданной модели. Для сохранения файла можно воспользоваться панелью

инструментов либо командой сохранения файла из раздела *File*. В появившемся диалоговом окне ввести имя файла, и файл модели будет сохранен в текущей директории MATLAB (по умолчанию – директория *Work*).

5. Установить параметры моделирования. Для этого в разделе *Simulation* в меню пользователя выбрать команду *Parameters*, которая откроет окно настроек параметров моделирования.

6. Запустить процесс моделирования, воспользовавшись панелью инструментов окна модели или командой *Start* раздела *Simulation*.

Рассмотрим особенности настройки часто используемого блока *Scope*, входящего в модели.

Блок *Scope* позволяет в процессе моделирования наблюдать динамику изменения сигналов в системе. Создаваемое с его помощью «смотровое окно» напоминает экран измерительного прибора. Открыть окно блока можно только после того, как блок помещен в окно модели (дважды щелкнув на изображении блока ЛКМ). Размер и пропорции окна можно менять произвольно, используя курсор мыши.

По оси ординат шкалы измерений откладываются значения наблюдаемой величины, по оси абсцисс – значения модельного времени.

В случае векторного входного сигнала для каждого элемента вектора в окне строится отдельная кривая. Выводимые кривые различаются цветом, который устанавливается автоматически.

Для управления параметрами окна блока в нем имеется панель меню (рис. 2.5).

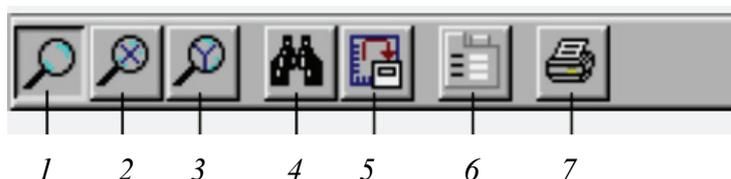


Рис. 2.5. Панель инструментов блока *Scope*:

- 1 – изменение масштаба осей графика;
- 2 – изменение масштаба по оси абсцисс;
- 3 – изменение масштаба по оси ординат;
- 4 – автоматическая установка оптимального масштаба осей;
- 5 – запоминание установленного масштаба осей;
- 6 – вызов диалогового окна настройки параметров блока;
- 7 – печать содержимого окна блока

Для изменения масштаба по выбранной оси координат необходимо сначала нажать на одну из кнопок изменения масштаба, подвести курсор мыши к участку графика, который должен быть отображен в новом масштабе, щелкнуть ЛКМ.

Окно настройки параметров блока (окно *Properties*) открывается щелчком ЛКМ на управляющей кнопке 6 (рис. 2.5). Оно содержит две вкладки:

- *Axis* (оси), позволяющая устанавливать параметры осей графика;
- *Setting* (установки), предназначена для ввода дополнительных параметров блока.

При моделировании сложных систем с помощью пакета Simulink целесообразным является формирование отдельных блоков в виде подсистем, для которых можно задавать собственные параметры. Подсистема формируется из группы отдельных блоков следующим образом: выделяется группа блоков, в меню *Edit* выбирается опция *Create Subsystem* и после этого группа блоков преобразуется в один блок с соответствующим числом входов и выходов.

Маскируемая подсистема выделяется нажатием левой клавиши мыши, в меню *Edit* выбирается опция *Mask Subsystem* и после этого появляется окно, где можно задавать параметры маскируемой подсистемы. Далее выбирается панель *Initialization*, где в окне *Prompt* вводится наименование параметра подсистемы, которое будет в дальнейшем отображаться, а в окне *Variable* задается описывающая этот же параметр переменная, которая в дальнейшем вводится в окна параметров различных блоков. Таким образом, маскирование подсистемы позволяет задавать глобальные переменные, относящиеся ко всей подсистеме.

### 2.3. Лабораторная работа № 4 ЦИФРОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ. GMSK-МОДУЛЯТОР

*Цель работы:* изучение временных диаграмм на входе и выходе GMSK-модулятора, а также спектра модулированного сигнала с помощью программы MATLAB.

#### *Краткие теоретические сведения*

В стандарте GSM применяется спектрально-эффективная гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (англ. GMSK – Gaussian minimum-shift keying). GMSK является манипуляцией с минимальным сдвигом (MSK) с использованием предмодуляционного гауссовского ФНЧ (фильтра низких частот), с помощью которого

увеличивается спектральная эффективность колебания за счет уменьшения ширины главного лепестка спектра и уровня боковых лепестков спектральной плотности. Основная особенность этого способа модуляции состоит в том, что приращение фазы несущего колебания на интервале времени, равном длительности  $T_c$  одного символа, всегда равно  $+90$  или  $-90$  в зависимости от знаков символов модулирующего сигнала.

Метод GMSK представляет собой частотную манипуляцию, при которой несущая частота дискретно (через интервалы времени, кратные периоду  $T$  битовой модулирующей последовательности) принимает значения:

$$f_H = f_0 - \frac{F}{4} \text{ или } f_B = f_0 + \frac{F}{4},$$

где  $f_0$  – центральная частота используемого частотного диапазона;  $F = 1/T$  – частота битовой последовательности.

Разнос частот  $\Delta f = f_B - f_H$  – минимально возможный, при котором обеспечивается ортогональность колебаний с частотами  $f_B$  и  $f_H$  на интервале  $T$  длительности одного бита. При этом за время  $T$  между колебаниями с частотами  $f_B$  и  $f_H$  набегает разность фаз, равная  $\pi$ .

Формирование GMSK-радиосигнала осуществляется таким образом, что на интервале одного информационного бита фаза несущей изменяется на  $90^\circ$ . Это наименьшее возможное изменение фазы, распознаваемое при данном типе модуляции.

Применение фильтра Гаусса позволяет при дискретном изменении частоты получить «гладкие переходы». В стандарте GSM применяется GMSK-модуляция, величина полосы фильтра по уровню  $-3$  дБ выбирается равной  $B = 0,3F$ , где  $F$  – частота битовой модулирующей последовательности. Конкретно, в стандарте GSM  $F = 279,833$  кГц, полоса гауссовского фильтра с величиной  $B = 81,3$  кГц. Использование гауссовского фильтра приводит к сужению главного лепестка и снижению боковых лепестков спектра сигнала на выходе модулятора. Этим снижается уровень помех по соседним частотным каналам. Структурная схема модулятора показана на рис. 2.6.

Входной цифровой сигнал  $b(t)$  нормируется по амплитуде и получается сигнал  $b_0(t)$  с нулевым средним. После  $b_0(t)$  подается на сглаживающий фильтр Гаусса  $G(\omega)$ , на выходе получают сглаженный сигнал  $b_g(t)$ . Этот сглаженный сигнал будет модулирующим сигналом частотного модулятора. Частота девиации при модуляции соответствует частоте девиации MSK (рад/с):

$$\omega_d = 0,5\pi Br,$$

где  $Br$  – скорость передачи цифровой информации. В результате получается смодулированный сигнал  $S_{\text{GMSK}}(t)$  на несущей частоте  $\omega_0$ .

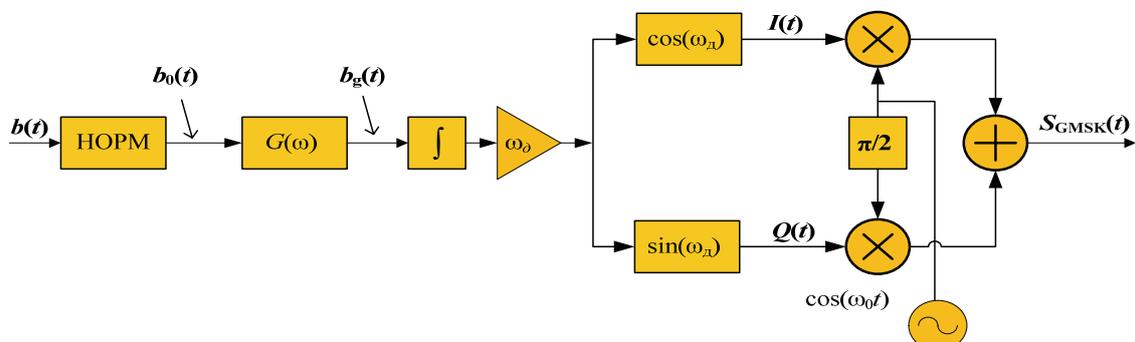


Рис. 2.6. Структурная схема модулятора GMSK

При этом сигнал  $b_g(t)$  должен быть нормирован по амплитуде к единице, т. е.  $|b_g(t)| \leq 1$ .

Применение гауссовского фильтра приводит к межсимвольной интерференции тем больше, чем меньше параметр  $BT$ .

*Фильтр Гаусса и его характеристики.* ФНЧ Гаусса задается импульсной характеристикой:

$$g(t) = \frac{BT}{T} \sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}} \exp\left(-\frac{2\pi^2 BT^2}{\ln 2T^2} t^2\right), \quad (2.1)$$

где  $BT$  – безразмерная величина:  $BT = B_{-3 \text{ дБ}} \cdot T$ ,  $B_{-3 \text{ дБ}}$  – полоса фильтра Гаусса по уровню  $-3$  дБ;  $T = 1/Br$  – длительность единичного импульса цифровой информации, передаваемой со скоростью  $Br$  бит/с. Например,  $Br = 20$  кбит/с, тогда  $T = 50$  мкс и при полосе фильтра Гаусса по уровню  $-3$  дБ  $B_{-3 \text{ дБ}} = 10$  кГц получаем  $BT = 10$  кГц  $\cdot$   $50$  мкс  $= 0,5$ . Таким образом, параметр  $BT$  показывает, во сколько раз полоса фильтра Гаусса  $B_{-3 \text{ дБ}}$  отличается от скорости передачи информации  $Br$ , выраженной в единицах измерения частоты.

ФНЧ Гаусса на нулевой частоте имеет коэффициент передачи, равный 1 для любых  $BT$ . На рис. 2.7 представлены импульсные характеристики  $g(t_n)$  фильтра Гаусса при  $T = 1$  с и различных параметрах  $BT$ .

На рис. 2.8 показана нормированная АЧХ фильтра Гаусса с нормировкой частоты. Здесь хорошо видно (обозначено пунктирными линиями), что нормированная полоса фильтра Гаусса по уровню  $-3$  дБ равна  $BT$ .

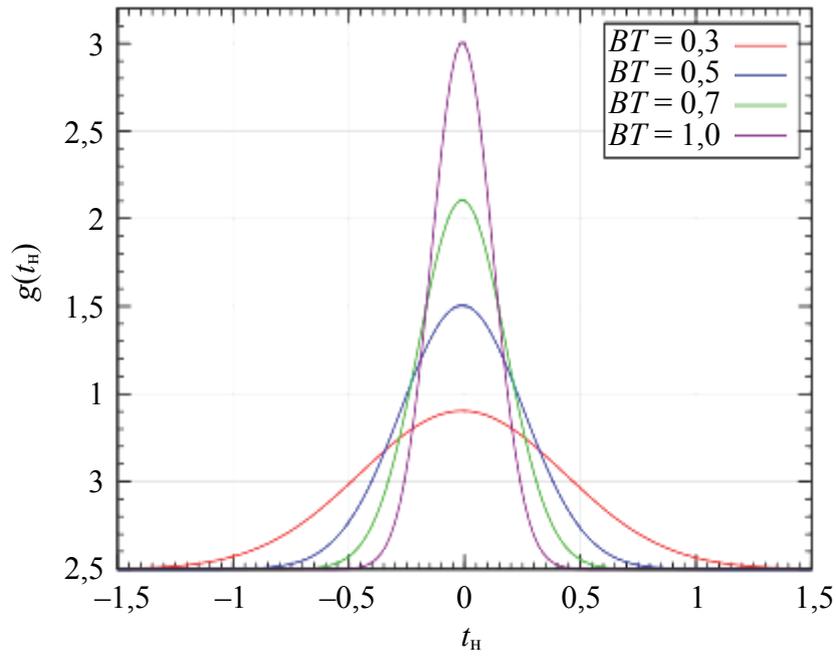


Рис. 2.7. Импульсные характеристики фильтра Гаусса при  $T = 1$  с и различных  $BT$

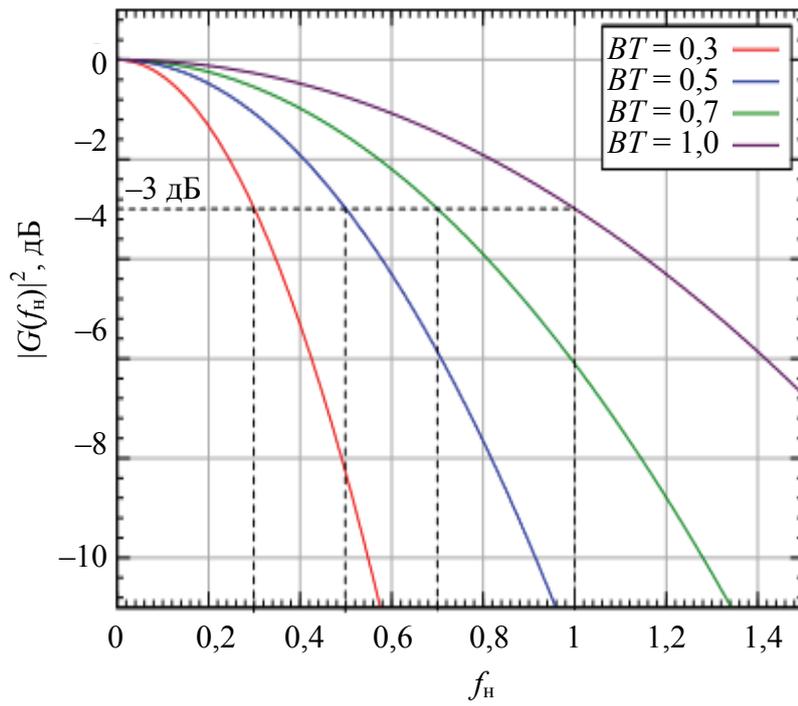


Рис. 2.8. Нормированная АЧХ фильтра Гаусса при различных параметрах  $BT$

### Порядок выполнения работы

1. Запустить программу MATLAB7, нажав левой кнопкой мыши на значок .

2. Выбрать в окне «MATLAB» *File* → *New* → *Model*.

3. В открывшемся рабочем окне создать имитационную модель MSK модулятора (рис. 2.9). Для упрощения поиска необходимых компонентов модели использовать внутреннюю поисковую систему пакета SimuLink. В блоке Vector Scope установить Input domain: Frequency.

4. Сохранить созданную имитационную модель в расширении \*.mdl, для чего выбрать в рабочем окне *File* → *Save As* → *Имя файла* → *Сохранить (название папки)*. Пример имени файла: Lab\_1\_01\_09\_2012\_Ivanov.

5. Исследовать созданную модель, предварительно установив в блоках модели параметры:

- PN Sequence Generator. Sample time: 1/1200;
- Unipolar to Bipolar Converter. M-ary number: 2;
- Zero-Order Hold, Zero-Order Hold 1. Sample time (-1 for inherited): 1/1200;
- Memory. Initial condition:1; Inherit sample time – флажок;
- Buffer. Output buffer size (per channel): 2;
- Sine Wave. Frequency (rad/sec):  $600 \cdot \pi$ ; Phase (rad):  $-\pi$ ;
- Sine Wave2. Frequency (rad/sec):  $76000 \cdot \pi$ ; Phase (rad): 0;
- Memory1. Initial condition:0; Inherit sample time – флажок;
- Transport Delay. Time delay: 1/1200; Initial buffer size: 1024;
- Transport Delay1. Time delay:  $3/38000/4$ ; Initial buffer size: 1024;
- Zero-Order Hold 2. Sample time (-1 for inherited): 1/4000/3.

6. Создать модель GMSK, представленную на рис. 2.10.

7. Исследовать модель GMSK, предварительно установив в блоках модели параметры для стандарта GSM. В блоке GMSK Modulator *BT* последовательно устанавливая равным 1,0; 0,7; 0,5; 0,3.

8. Сохранить созданную имитационную модель в расширении \*.mdl.

9. Исследовать модель GMSK, предварительно установив в блоках модели параметры для стандарта GSM:

- Random Integer Generator. M-ary number: 2; Initial seed: 500; Sample time: 1/270000; Frame-based outputs: ; Samples per frame: 1; Output data type: unit32;



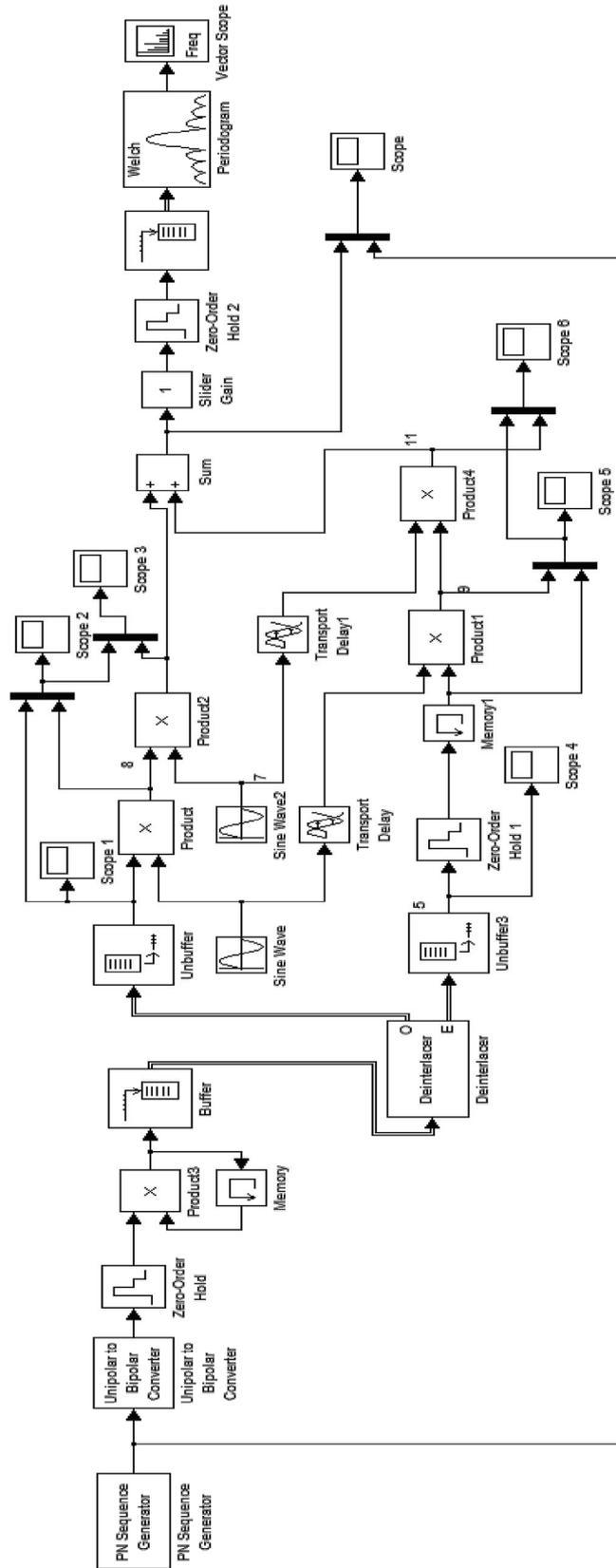


Рис. 2.9. Схема MSK-модулятора

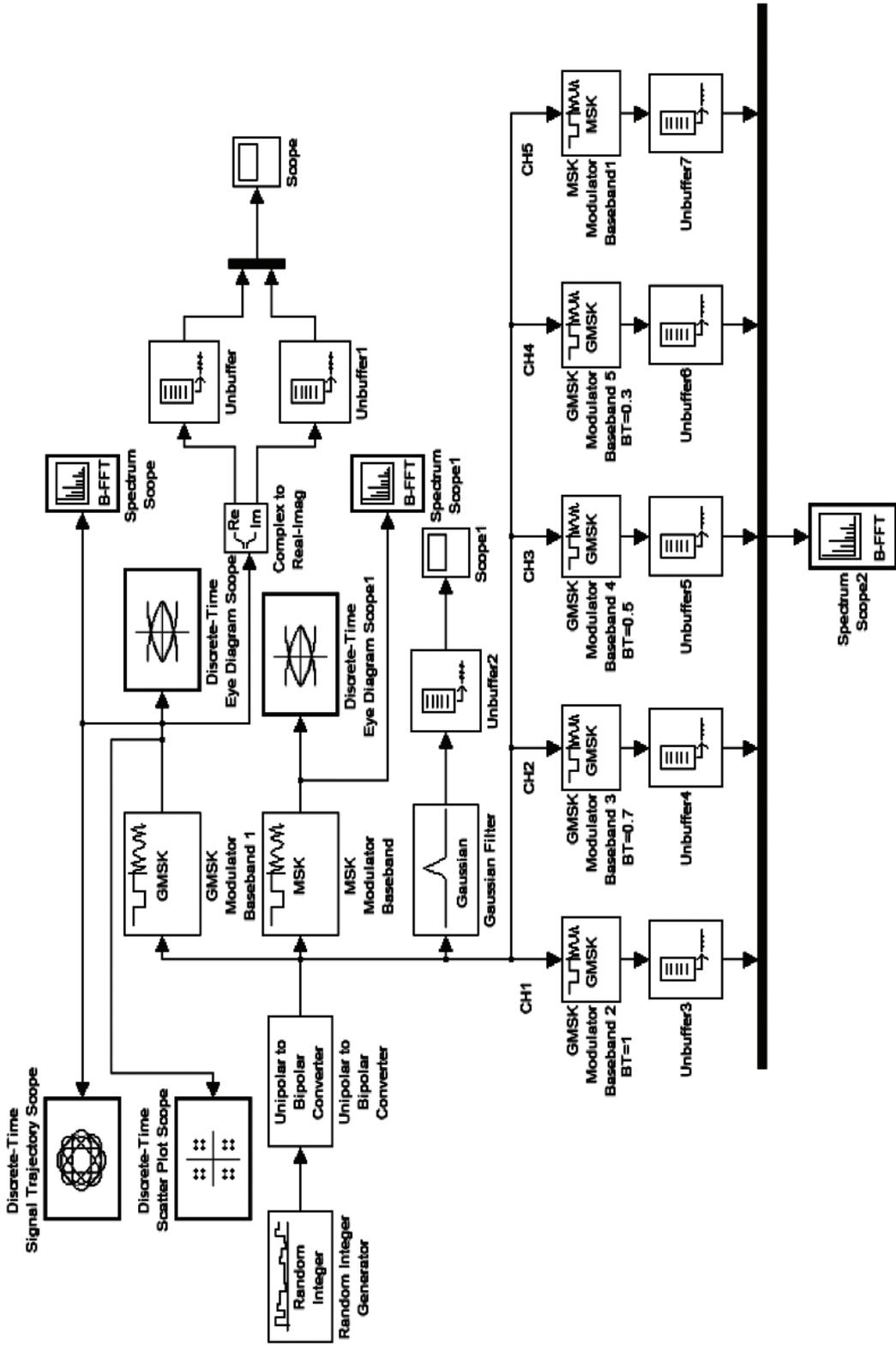


Рис. 2.10. Имитационная модель GMSK

- Unipolar to Bipolar Converter. M-ary number: 2; Polarity: Positive; Output data type: double;
- GMSK Modulator Baseband 1. Input type: Integer; BT product: 0,3; Pulse length (Symbol intervals): 4; Symbol prehistory: 1; Phase offset (rad): 0; Samples per symbol: 8; Output data type: Double;
- MSK Modulator Baseband 1. Input type: Integer; Phase offset (rad): 0; Samples per symbol: 8; Out data type: Double;
- Gaussian Filter. BT product: 0,3;
- Spectrum Scope. Scope Properties. Spectrum units: dBW/Hertz; Spectrum type: Two-sided (-Fs/2...Fs/2); Buffer input: ; Buffer size: 128; Buffer overlap: 0; Window / sampling: Periodic; Number of spectral averages: 2;
- Stop simulation: 0,017.

10. Создать имитационную модель Gaussian Filter, представленную на рис. 2.11.

11. Сохранить созданную имитационную модель в расширении \*.mdl, для чего выбрать в рабочем окне *File* → *Save As* → *Имя файла* → *Сохранить (название папки)*.

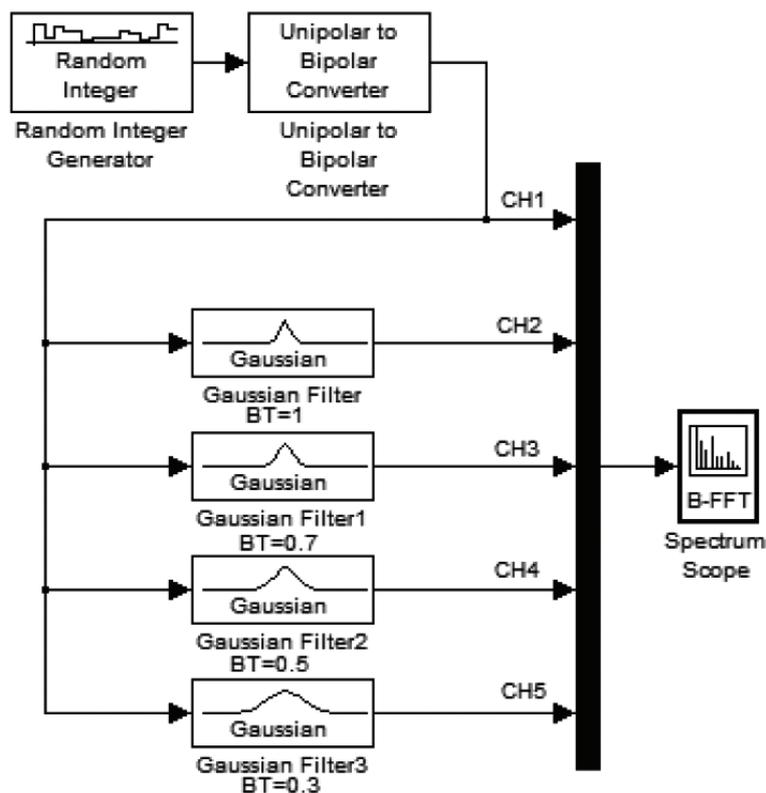


Рис. 2.11. Имитационная модель Gaussian Filter

12. Исследовать созданную модель, предварительно установив в блоках модели параметры:

– Random Integer Generator. M-ary number: 2; Initial seed: 500; Sample time: 1/270000;

– Unipolar to Bipolar Converter. M-ary number: 2;

– Stop simulation: 0,017.

13. Наблюдать спектр сигнала на выходе фильтра при различных  $BT$ .

### ***Задание на лабораторную работу***

1. Создать с использованием среды MATLAB имитационные модели.

2. Получить временные и спектральные характеристики сигналов и проанализировать их.

3. Рассчитать импульсную характеристику ФНЧ Гаусса для стандарта GSM.

4. Провести иллюстрацию импульсных характеристик и нормированных АЧХ фильтра Гаусса при различных  $BT$  с использованием визуализации характеристик фильтров (Filter Visualization Tool).

#### ***Содержание отчета***

1. Титульный лист.

2. Цель работы и задание на лабораторную работу.

3. Схема модулятора с пояснением назначения его узлов и схемы моделей для изучения GMSK.

4. Результаты расчетов.

5. Полученные временные и спектральные характеристики сигналов.

6. Выводы по полученным данным.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как формируется GMSK-сигнал?

2. Назовите основные параметры GMSK-манипулятора.

3. Что означает ортогональность сигналов?

4. С какой целью удваивается длительность первоначальной битовой последовательности?

5. Какие функции выполняет блок Deinterlacer в схеме модулятора MSK?



6. Что способствует сужению главного лепестка спектра модулированного сигнала?

7. Что такое глазковая диаграмма?

8. Как зависит межсимвольная интерференция от параметра  $BT$ ?

## 2.4. Лабораторная работа № 5 ЦИФРОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ. QPSK-МОДУЛЯТОР

*Цель работы:* исследование структурной модели QPSK-манипулятора; наблюдение временных диаграмм формирования сигналов структурной модели QPSK-манипулятора; исследование сигнальных созвездий и спектров квадратурных манипуляций.

### Краткие теоретические сведения

*Квадратурная фазовая манипуляция.* Квадратурная фазовая манипуляция, или QPSK – это принцип модуляции, при котором фаза модулированного сигнала сдвигается в зависимости от входного потока бит на угол  $-135^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$  или  $+135^\circ$ . QPSK-модуляция строится на основе кодирования двух бит передаваемой информации одним символом. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

Для того чтобы осуществить кодирование одним символом двух бит информации, необходимо, чтобы созвездие (график) состояло из четырех точек, как это показано на векторной диаграмме QPSK (рис. 2.12).

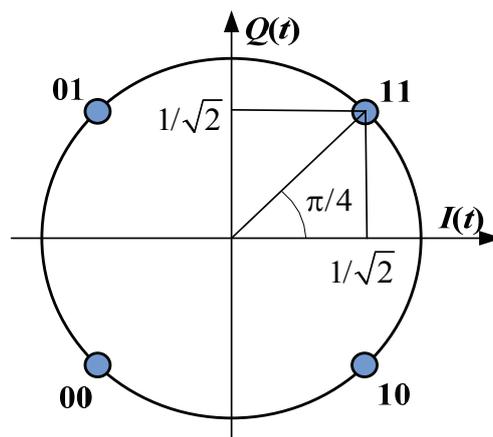


Рис. 2.12. Векторная диаграмма QPSK-сигнала

Тогда мы получим, что и  $I(t)$  и  $Q(t)$  отличны от нуля, все точки созвездия расположены на единичной окружности. Кодирование можно осуществить следующим образом: разбить битовый поток на четные и нечетные биты, тогда  $I(t)$  будет кодировать четные биты, а  $Q(t)$  – нечетные.

Два последовательно идущих друг за другом бита информации кодируются одновременно синфазным  $I(t)$  и квадратурным  $Q(t)$  сигналами. Это наглядно показано на осциллограммах, приведенных на Рис. 2.13 для информационного потока «110010110100001».

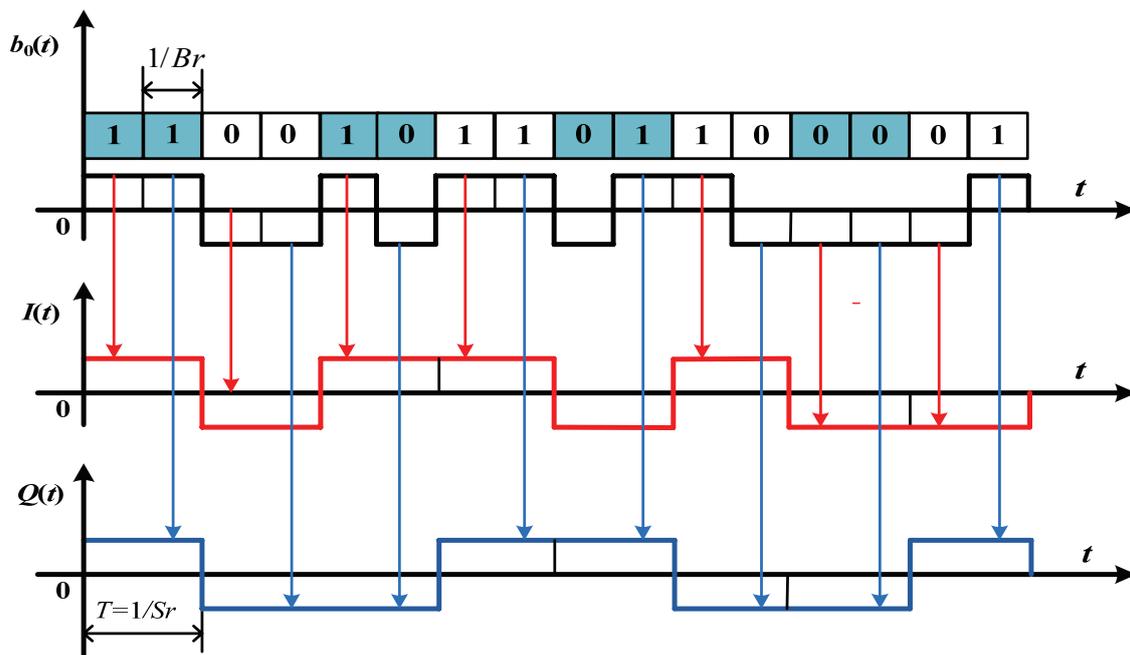


Рис. 2.13. Синфазная и квадратурная составляющие QPSK-сигнала

На верхнем графике входной поток разделен на пары бит, соответствующих одной точке созвездия QPSK, показанного на рис. 2.12. На втором графике показана осциллограмма  $I(t)$ , соответствующая передаваемой информации.  $I(t) > 0$ , если четный бит равен 1 и  $I(t) < 0$ , если четный бит 0 (т. е.  $b_0(t) < 0$ ). Аналогично строится квадратурный канал  $Q(t)$ , но только по нечетным битам. Длительность одного символа  $T = 1/Sr$  ( $Sr$  – символьная скорость передачи) в два раза больше длительности одного бита исходной информации.

Структурная схема QPSK-модулятора на основе универсального квадратурного модулятора показана на рис. 2.14.

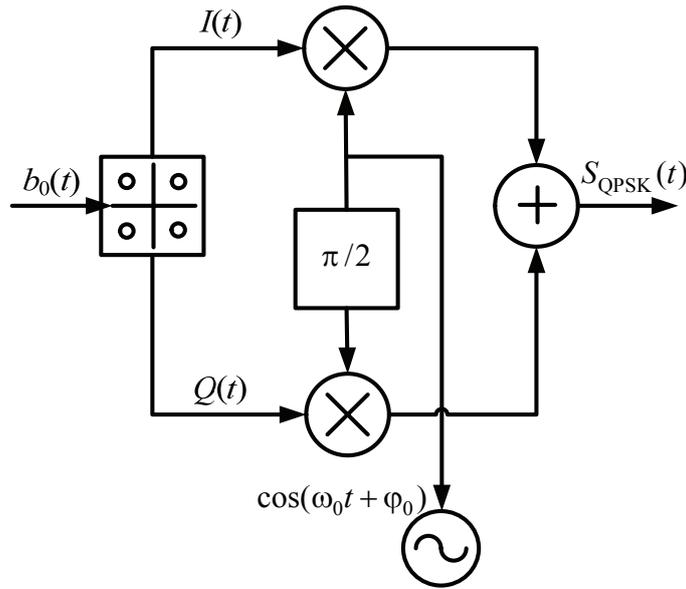


Рис. 2.14. Квадратурный модулятор с фазовращателем

Сигнал  $S_{QPSK}(t)$  имеет вид:

$$S_{QPSK}(t) = I(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) - Q(t)\sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.2)$$

Синфазная  $I(t)$  и квадратурная  $Q(t)$  составляющие – это не что иное, как реальная и мнимая части комплексной огибающей QPSK-сигнала  $z(t) = I(t) + jQ(t)$ , которые являются входными сигналами квадратурного модулятора.

Фазовая огибающая представляет собой ступенчатую функцию времени, претерпевающую разрывы в моменты смены символа QPSK (напомним, что один символ QPSK несет два бита информации). При этом в пределах одного символа векторная диаграмма QPSK находится всегда в одной точке созвездия, как это показано внизу, а при смене символа – скачкообразно переходит в точку, соответствующую следующему символу. Поскольку у QPSK всего четыре точки в созвездии, то фазовая огибающая может принимать всего четыре значения:  $\pm\pi/4$  и  $\pm3\pi/4$ . При этом фаза следующего символа относительно предыдущего может не измениться, или измениться на  $\pm\pi/2$  или на  $\pm\pi$  радиан.

Амплитудная огибающая QPSK сигнала  $a(t)$  также может быть получена из комплексной огибающей  $z(t)$ :

$$a(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}. \quad (2.3)$$



Отметим, что амплитудная огибающая QPSK-сигнала равна единице всюду, за исключением моментов смены передаваемых символов, т. е. в моменты перескока фазы и перехода к очередной точке созвездия.

*Критерии качества.* Важнейший параметр систем цифровой связи – отношение сигнал/шум. Критерием качества является отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума ( $S/N$  или SNR). В цифровой связи в качестве критерия качества чаще используется нормированная версия SNR:  $E_b/N_0$ .  $E_b$  – это энергия бита, и ее можно описать как мощность сигнала  $S$ , умноженную на время передачи бита  $T_b$ .  $N_0$  – это спектральная плотность мощности шума, и ее можно выразить как мощность шума  $N$ , деленную на ширину полосы  $W$ . Поскольку время передачи бита и скорость передачи битов  $R_b$  взаимно обратимы,  $T_b$  можно заменить на  $1/R_b$ :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{ST_b}{N/W} = \frac{S/R_b}{N/W}. \quad (2.4)$$

Вероятность появления ошибочного бита при оптимальном детектировании сигнала двоичной фазовой манипуляцией (BPSK):

$$P_b = Q \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}, \quad (2.5)$$

где  $Q$  – гауссов интеграл ошибок (обычно табулирован).

Каждый из ортогональных каналов BPSK, так же как и составной сигнал QPSK, характеризуется одним отношением  $E_b/N_0$ , а значит – такой же вероятностью  $P_b$ , что и сигнал BPSK. Ортогональность (разность фаз  $90^\circ$ ) соседних символов QPSK приводит к равным вероятностям появления ошибочного бита для схем BPSK и QPSK.

Следует отметить, что вероятности появления ошибочного символа для этих схем не равны.

Существует два основных критерия сравнения эффективности различных видов модуляции. Это критерии спектральной и энергетической эффективности. Спектральная эффективность характеризует полосу частот, необходимую для передачи информации с определенной скоростью. Энергетическая эффективность описывает мощность, необходимую для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки).

Спектральная эффективность  $R_b/W$  – отношение скорости передачи (бит/с) к ширине используемой полосы пропускания радиоканала (Гц).

Введем обозначения:

- $R_b = \log_2 M/T_s$  ( $M$  – объем алфавита символов);
- $M = \log_2 k$  ( $k$  – число бит в одном символе);
- $T_s$  – длительность символа;
- полоса  $W = 1/T_s$  при амплитудно-фазовой манипуляции и  $W = M/T_s$  при частотной манипуляции.

Тогда спектральная эффективность равна

$$\frac{R_b}{W} = \log_2 M \quad (\text{АФМ}), \quad \frac{R_b}{W} = \frac{\log_2 M}{M} \quad (\text{ЧМ}). \quad (2.6)$$

При QPSK каждому значению фазы модулированного сигнала соответствует два бита информации, поэтому изменение модулирующего сигнала при QPSK-модуляции происходит в два раза реже, чем при BPSK-модуляции при одинаковой скорости передачи информации. Спектральная плотность мощности многоуровневого сигнала совпадает со спектральной плотностью мощности бинарного сигнала при замене битового интервала  $T_b$  на символьный интервал  $T_s = T_b \log_2 M$ . Для четырехуровневой модуляции  $M = 4$  и, следовательно,  $T_s = 2T_b$ .

Расстояние между первыми нулями спектральной плотности мощности сигнала QPSK равно  $\Delta f = 1/T_b$ , что в два раза меньше, чем для сигнала BPSK. Другими словами, спектральная эффективность квадратурной модуляции QPSK в два раза выше, чем бинарной модуляции BPSK.

*Максимальная пропускная способность канала.* Согласно теореме Шеннона – Хартли, максимальная скорость передачи информации (бит/с) по каналу с белым гауссовым шумом

$$R_b = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.7)$$

где  $W$  – полоса пропускания;  $S$  и  $N$  – средняя мощность сигнала и шума.

Подставив  $S = \frac{E_b}{T_b}$ ,  $N = N_0 W$ ,  $R_b = \frac{1}{T_b}$  в выражение (2.7), получим

$$\frac{R_b}{W} = \log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} \frac{R_b}{W} \right). \quad (2.8)$$

Соотношение (2.8) устанавливает зависимость максимальной теоретически достижимой спектральной эффективности  $R_b/W$  от удельных энергетических затрат  $E_b/N_0$ .

Фазовая манипуляция предпочтительнее с точки зрения повышения спектральной эффективности, частотная манипуляция – с точки зрения снижения энергетических затрат. Спектральная эффективность квадратурной фазовой манипуляции ( $M = 4$ ) выше, чем двоичной ( $M = 2$ ) при тех же энергетических затратах. Частотная манипуляция 2ЧМ энергетически менее эффективна, чем 4ЧМ, при одинаковой спектральной эффективности.

Увеличение спектральной эффективности при той же вероятности ошибки достигается повышением энергетических затрат. При выборе компромиссного решения учитывается конкретная цена ресурсов мощность-полоса, зависящая от типа системы.

Снижая спектральную эффективность и применяя методы помехоустойчивого кодирования, можно безошибочно передавать информацию при достаточно низком отношении сигнал/помеха.

Минимально допустимое значение  $E_b/N_0$  можно найти из (2.8) при предельном переходе  $R_b/W \rightarrow 0$ . Из (2.8) следует:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{R_b/W} - 1}{R_b/W}, \text{ при } \frac{R_b}{W} \rightarrow 0. \quad (2.9)$$

$$\lim_{N_0} \frac{E_b}{N_0} = \lim_{N_0} 2^{R_b/W} \ln 2 = \ln 2 = 0,693 = -1,6 \text{ дБ.}$$

Значение  $E_b/N_0 = 0,693 = -1,6$  дБ называют пределом Шеннона. Какие бы методы помехоустойчивого кодирования не применялись, передача информации без ошибок невозможна, если  $E_b/N_0 < 0,693$ .

Подвидами семейства QPSK являются дифференциальная квадратурная модуляция (DQPSK) и квадратурная модуляция со сдвигом (OQPSK – Offset QPSK).

DQPSK, аналогично DBPSK, используется из-за неоднозначности фазы восстановленной несущей, в этом случае кратной  $\pi/2$ . Как и в случае DBPSK, кодируется относительное изменение фазы по отношению к значению на предыдущем символьном интервале.

Модуляция OQPSK является более эффективной, чем QPSK, в системах с нелинейным усилением. В случае OQPSK максимальное изменение фазы составляет  $\pi/2$ . Максимальный уровень изменения амплитуды огибающей для OQPSK составляет 30% по сравнению со 100% для обычной QPSK. Формируется OQPSK достаточно просто: путем смещения сигналов  $I(t)$  и  $Q(t)$  друг относительно друга на величину, равную длительности одного бита.

QPSK (ее различные подвиды) является одним из наиболее часто используемых видов модуляции в современных стандартах цифровой связи.

### **Порядок выполнения работы**

1. Запустить программу MATLAB7, нажав левой кнопкой мыши на значок .

2. Выбрать в окне «MATLAB» *File* → *New* → *Model*.

3. В открывшемся рабочем окне создать имитационную модель QPSK-модулятора (рис. 2.15). Для упрощения поиска необходимых компонентов модели использовать внутреннюю поисковую систему пакета SimuLink.

4. Сохранить созданную имитационную модель в расширении \*.mdl, для чего выбрать в рабочем окне *File* → *Save As* → *Имя файла* → *Сохранить* (*название папки*). Пример имени файла: Lab\_1\_01\_09\_2012\_Ivanov.

5. Исследовать созданную модель, предварительно установив в блоках модели параметры:

- PN Sequence Generator. Sample time: 1/1200;
- Unipolar to Bipolar Converter. M-ary number: 2;
- Buffer. Output buffer size (per channel): 2;
- Sine Wave. Frequency (rad/sec): 753600; Phase (rad):  $-\pi/2$ ;
- Sine Wave 1. Frequency (rad/sec): 753600; Phase (rad): 0;
- Scope. Time range: 12; Tick labels: all;
- Simulation time Start time: 0.0; Stop time: 12.0.

6. Создать имитационную модель QPSK-модулятора (рис. 2.16).

7. Сохранить созданную имитационную модель в расширении \*.mdl.

8. Исследовать созданную модель, предварительно установив в блоках модели параметры:

– значение порождающего полинома короткой ПСП Random Integer в Initial seed – согласно пяти последним цифрам номера билета учащегося, а код второго Random Integer получить смещением на один разряд предыдущего порождающего полинома;

- M-ary number: 2;
- Sample time:  $1/1.2288/10^6$ ;
- кодовый индекс генератору кода Уолша принять равным двум последним цифрам номера билета учащегося;
- Sample time:  $1/1.2288/10^6$ ;
- установить время расчета: 0.128.

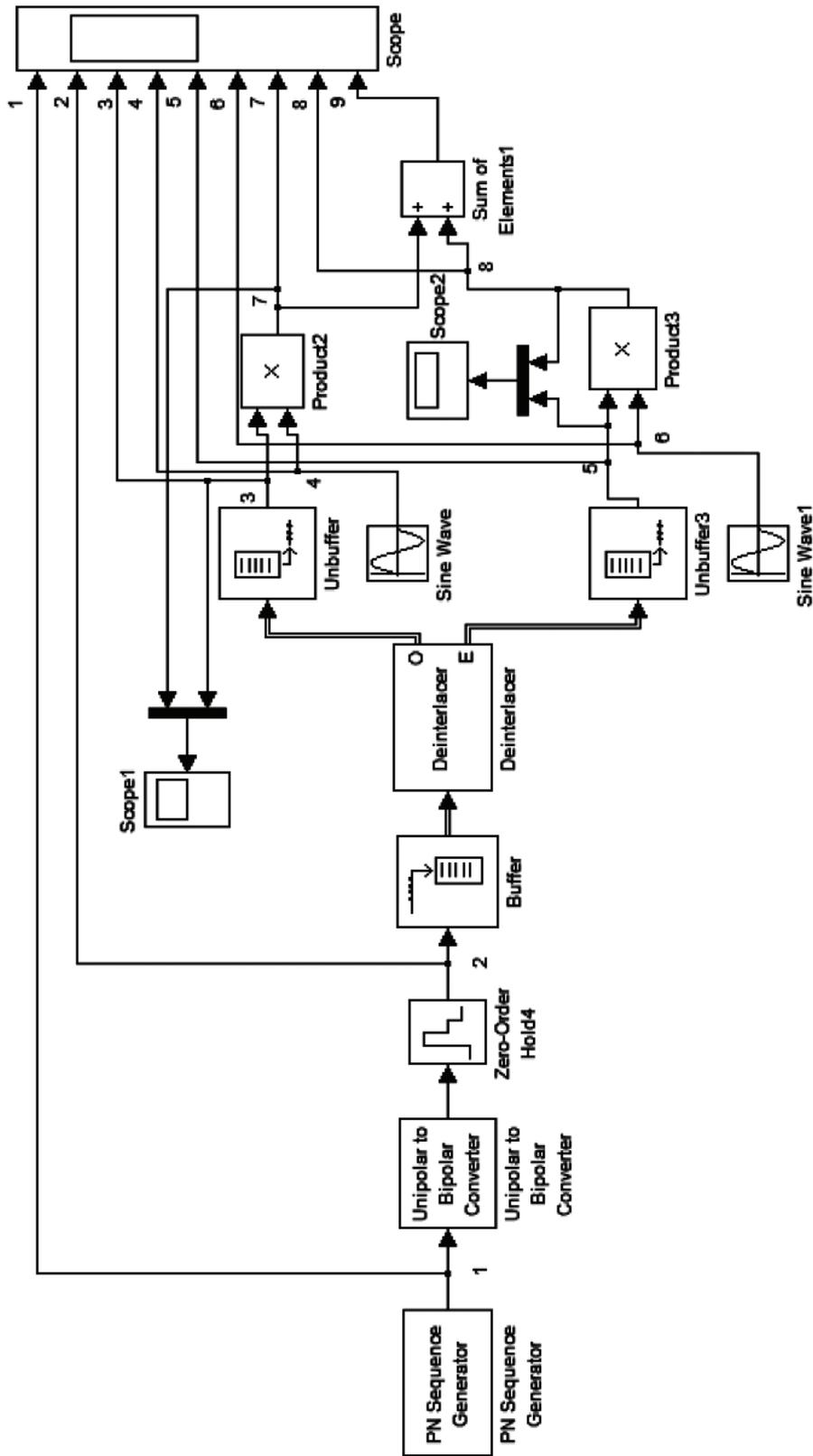


Рис. 2.15. Схема исследования манипулятора QPSK

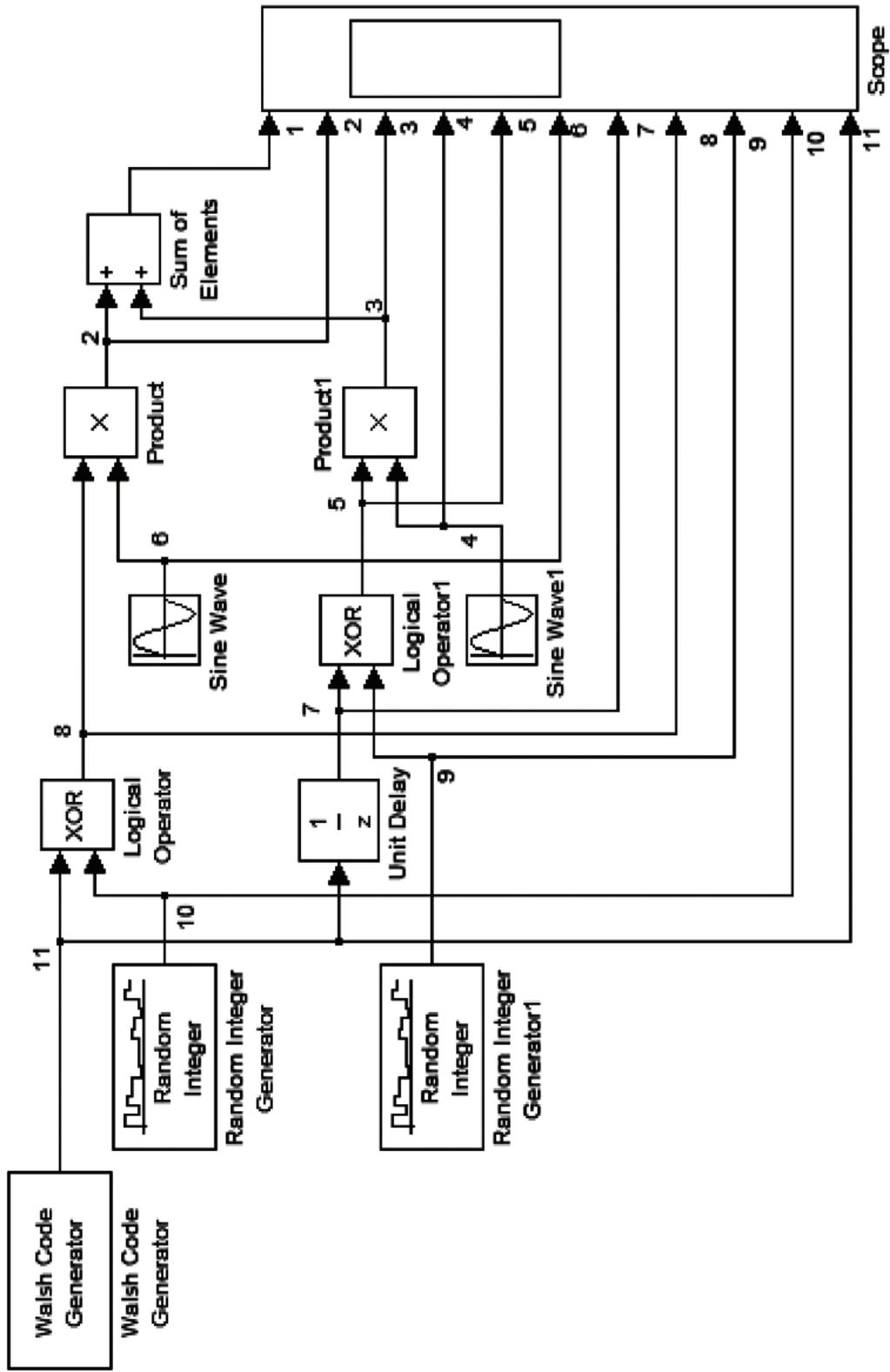


Рис. 2.1.6. Схема исследования манипулятора QPSK

9. Исследовать сигнальные созвездия квадратурных манипуляций, для этого:

- собрать последовательно схемы исследования (рис. 2.17, 2.18) применяя вышеизложенную методику, и сохранить созданные имитационные модели в расширении \*.mdl;

- установить в Random Integer: Sample time:  $1/(38400/544*200)$ , флажок – Frame-based outputs, Samples per frame: 200;

- установить время расчета: 0.1;

- в блоке Error Rate Calculator параметр Output data должен быть переключен на Port;

- изменять параметр M от 2 до 256 в блоках Random Integer, Rectangular QAM (в блоке AWGN установить отношение сигнал/шум не менее 30 дБ);

- наблюдать и зарисовать сигнальные созвездия в отчет. Подписать каждое сигнальное созвездие, указав, к какому виду манипуляции оно относится;

- исследовать помехоустойчивость модуляции 4QAM, для чего построить зависимость BER (Bit Error Rate) =  $f(\text{SNR})$ , изменяя  $E_s/N_0$  в блоке AWGN от –30 до 30 дБ с шагом 10 дБ.

10. Исследовать помехоустойчивость модуляции QPSK. Для этого:

- установить в Random Integer: Sample time:  $1/(36000/512*108)$ ; флажок – Frame-based outputs; Samples per frame: 108; M-ary number: 4;

- установить в Integer to Bit Converter: Number of bits per integer(M): 2;

- установить в Bit to Integer Converter: Number of bits per integer(M): 2;

- установить время расчета: 0.1;

- построить зависимости SER (Symbol Error Rate) =  $f(\text{SNR})$  и BER (Bit Error Rate) =  $f(\text{SNR})$ , изменяя  $E_s/N_0$  в блоке AWGN от –30 до 30 дБ с шагом 10 дБ. Для этого можно использовать графический пользовательский интерфейс BERTool (новая версия Release 14). Вызывают интерфейс командой bertool в Command Window.

11. Открыть демонстрационную модель TETRA (Terrestrial Trunked Radio) physical layer PI/4-DQPSK modulation (рис. 2.19). Скопировать файл в рабочую модель и сохранить ее.

12. Установить время расчета по заданию преподавателя и включить схему.

13. Занести наблюдаемые диаграммы в отчет для различных значений SNR (–10; 0; 10; 20; 30).



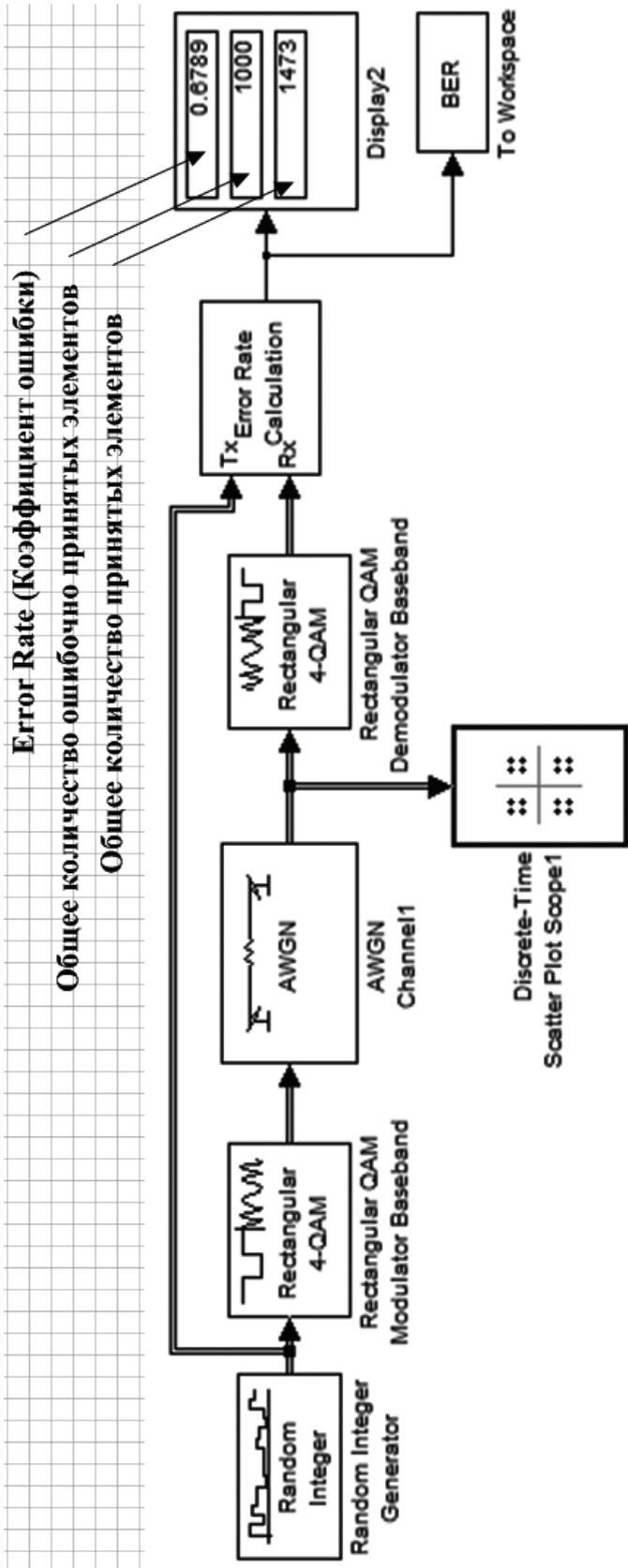


Рис. 2.17. Схема электрическая структурная QAM

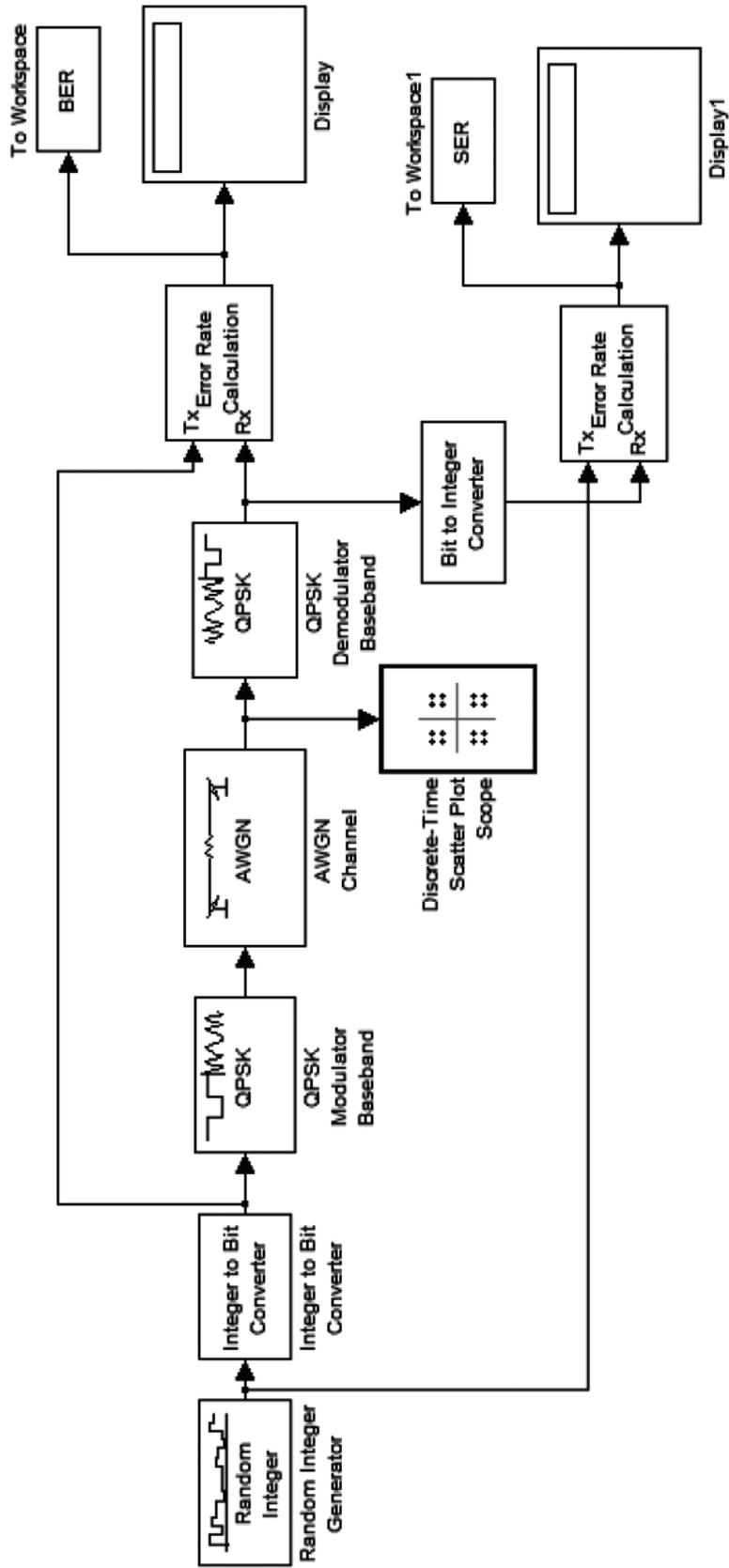


Рис. 2.18. Схема электрическая структурная исследования QPSK

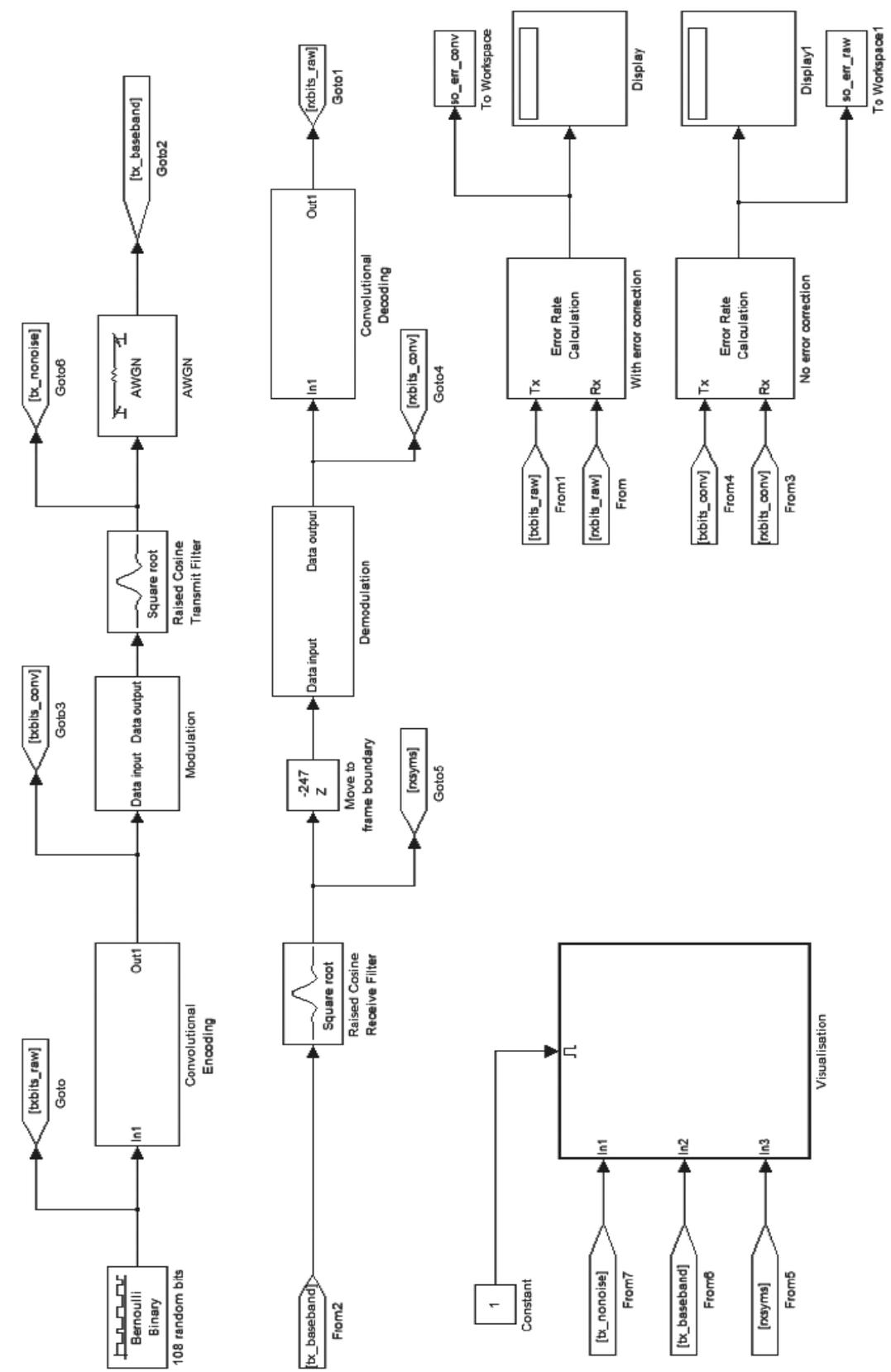


Рис. 2.19. Модель TETRA physical layer PI/4-DQPSK modulation

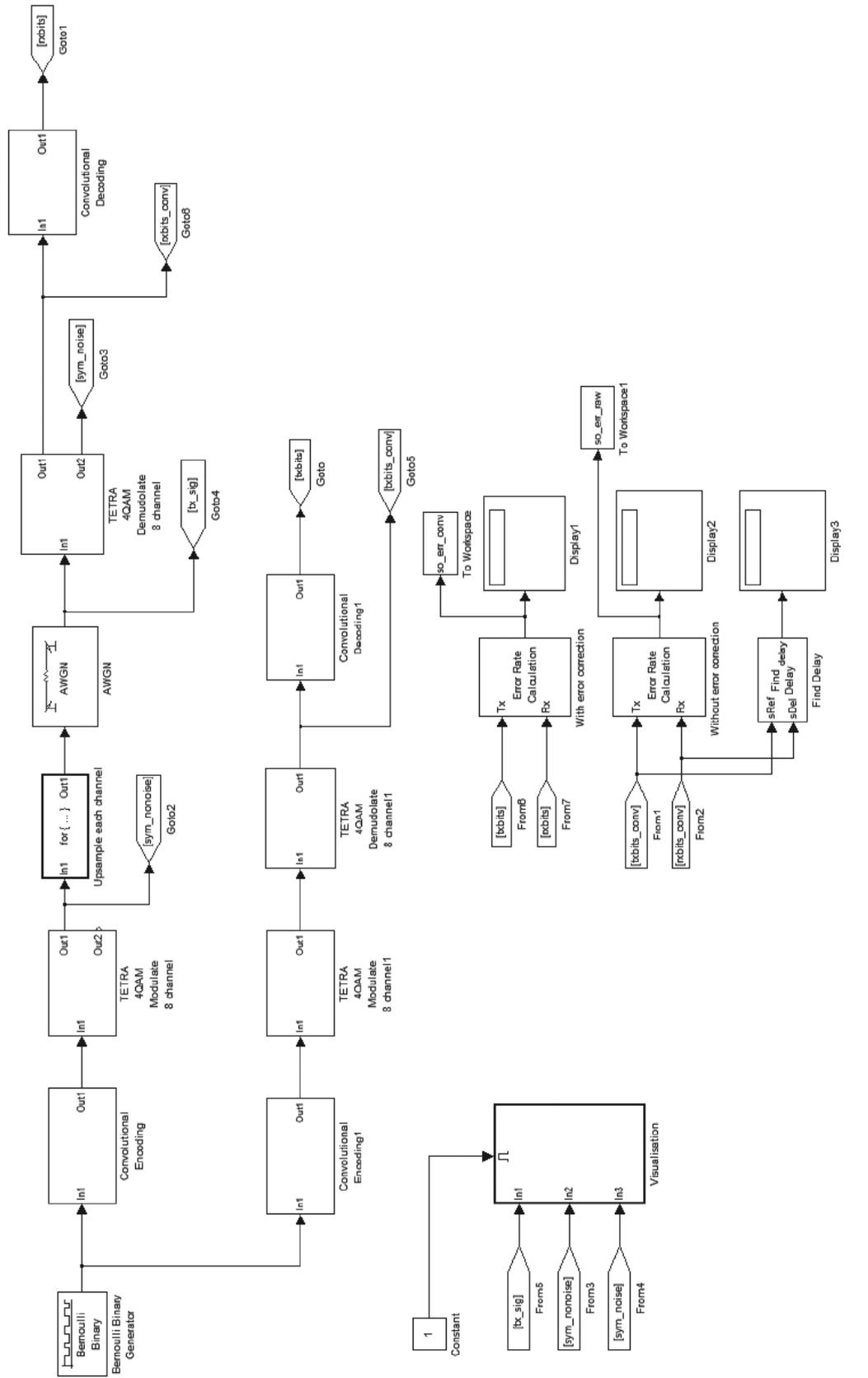


Рис. 2.20. Модель ТЕТРА physical layer 4-QAM modulation

14. Наблюдать диаграммы и построить зависимость BER (Bit Error Rate) =  $f(\text{SNR})$ , изменяя  $E_s/N_0$  в блоке AWGN от  $-2$  до  $16$  дБ с шагом  $2$  дБ. Сделать выводы.

15. Выполнить п. 12–14 для демонстрационной модели TETRA (Terrestrial Trunked Radio) physical layer 4-QAM modulation (рис. 2.20).

### ***Задание на лабораторную работу***

1. Создать с использованием среды MATLAB имитационные модели.
2. Получить временные и спектральные характеристики сигналов и проанализировать их.

#### ***Содержание отчета***

1. Титульный лист.
2. Цель работы и задание на лабораторную работу.
3. Схема модулятора с пояснением назначения его узлов и схемы моделей для изучения QPSK.
4. Результаты наблюдений, вычислений, графики и диаграммы.
5. Выводы по полученным данным.

### ***Контрольные вопросы***

1. Опишите базовые принципы модуляции QPSK.
2. В чем различие между фазовой и относительной фазовой модуляциями?
3. В чем основные преимущества и недостатки многопозиционных систем передачи дискретных сообщений?
4. Что означают «символьная» и «битовая» вероятности ошибок?
5. Как связаны предельные показатели энергетической и спектральной эффективности цифровых систем передачи? Что такое «граница Шеннона»?
6. Как можно достичь границы Шеннона при многопозиционной передаче?
7. Перечислить достоинства и недостатки QPSK, OQPSK,  $\text{PI}/4$  DQPSK видов модуляции.
8. Из каких узлов состоит QPSK-манипулятор стандарта CDMA?
9. Что за устройство выполняет функцию источника сигнала в модели QPSK-манипулятора?
10. Сравните временные диаграммы информационного и манипулированного сигналов.
11. Сравните временные диаграммы двух генераторов Random Integer.

12. К какому типу системы CDMA можно отнести исследуемую модель?
13. В каком узле осуществляется расщепление, а в каком модуляция?
14. В каком узле осуществляется скремблирование, для чего оно проводится?
15. Где расположен генератор функции Уолша и псевдослучайной последовательности (ПСП)?
16. Какую функцию выполняет Product модели QPSK-манипулятора?
17. Какую функцию выполняет XOR модели QPSK-манипулятора?
18. Какую функцию выполняет Sum of Elements модели QPSK-манипулятора?
19. Какую функцию выполняет Unit delay модели QPSK-манипулятора?
20. Какой критерий используется для сравнения различных методов модуляции при передаче непрерывных сообщений?

## 2.5. Лабораторная работа № 6 АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ И ЗАМИРАНИЙ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

*Цель работы:* изучение имитационной модели системы цифровой связи, анализ ее помехоустойчивости; приобретение навыков создания подсистем и их маскирования.

### ***Краткие теоретические сведения***

В современных системах беспроводной цифровой связи передаваемый сигнал подвергается воздействию помех и замираний в канале, что обуславливает вероятность ошибки при приеме сигнала. Структурная схема радиоканала в общем виде представлена на рис. 2.21.

Сигнал может передаваться от передатчика к приемнику по множеству отражательных путей. Это явление, называемое многолучевым распространением (англ. multipath propagation), может вызывать флуктуации амплитуды, фазы и угла прибытия полученного сигнала, что определило название замирание вследствие многолучевого распространения (англ. multipath fading).



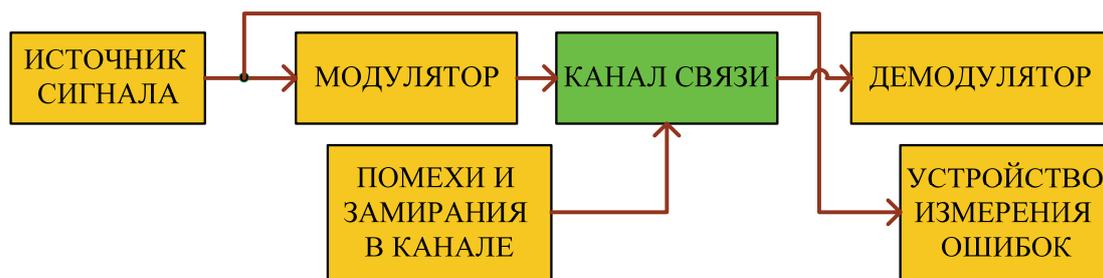


Рис. 2.21. Структурная схема радиоканала цифровой связи

В этой проблеме выделяют две составляющие:

1) Rayleigh fading – релейское затухание (рассеяние). Обусловлено диффузным характером отражения радиоволн от реальных объектов. Как результат, принимаемый сигнал есть сумма многих идентичных сигналов, отличающихся по фазе (и амплитуде тоже). Эффект проявляется на уровне радионесущей и дает «fading dips» – пульсации уровня, замирания с периодом в пространстве, равным  $\lambda/2$ . Для GSM-900 – это  $33/2 \approx 17$  см. Такой же эффект образуется и по времени, создавая быстрые замирания (пульсации) уровня сигнала;

2) Time Dispersion – эффект из-за существенно разнесенных по пространству лучей, т. е. прошедших дальние пути (англ. far away). Таким образом, можно говорить об интерференции символов от двух лучей. При длительности бита в TDMA  $\sim 3,7$  мкс, задержка на 1 бит эквивалентна разности путей около 1 км.

Прямое моделирование и проектирование систем, включающих методы борьбы с замиранием, обычно сложнее разработки систем, где единственным источником ухудшения рабочих характеристик считается шум AWGN.

Для мобильной связи характерны два типа замираний: крупномасштабное и мелкомасштабное замирание.

Крупномасштабное замирание отражает среднее ослабление мощности сигнала или потери в тракте вследствие распространения на большое расстояние. На это явление влияют выступающие наземные элементы (например, холмы, леса, рекламные щиты, группы строений и т. д.) между передатчиком и приемником. Приемник «затеняется» этими выступами. Статистика крупномасштабного замирания позволяет приблизительно рассчитать потери в тракте как функцию расстояния. Это часто описывается через средние потери в тракте (степенной закон  $n$ -го порядка) и логарифм нормального распределения отклонения от среднего.

Мелкомасштабное замирание – это значительные изменения амплитуды и фазы сигнала, которые на практике могут быть результатом небольших изменений (порядка половины длины волны) расстояния между передатчиком и приемником. Мелкомасштабное замирание проявляется двумя способами – расширение сигнала во времени (или дисперсия сигнала) и нестационарное поведение канала. В мобильной радиосвязи параметры каналов изменяются во времени, поскольку движение передатчика и/или приемника приводит в результате к изменению пути распространения. Скорость изменения таких условий распространения определяет скорость замирания (скорость изменения ухудшения характеристик вследствие замирания). Мелкомасштабное замирание называется релеевским, если имеется большое число многократно отражающихся путей и нет компонента сигнала вдоль луча обзора; огибающая такого полученного сигнала статистически описывается с помощью релеевской функции плотности вероятности. Если преобладает незамирающий компонент сигнала, такой как путь распространения вдоль луча обзора, огибающая мелкомасштабного замирания описывается функцией плотности вероятности Райса. Иными словами, статистики мелкомасштабного замирания всегда распределены по Релею, если путь распространения вдоль луча обзора блокирован, в противном случае имеем распределение Райса. Мобильный радиоприем на большом пространстве должен иметь возможность обрабатывать сигналы, подвергнувшиеся замираню обоих типов (мелкомасштабное, наложенное на крупномасштабное).

Крупномасштабное замирание (ослабление или потери в тракте) можно рассматривать как пространственное усреднение мелкомасштабных флуктуаций сигнала. Оно вычисляется, как правило, путем усреднения полученного сигнала по интервалу, превышающему 10–30 длин волн, чтобы отделить мелкомасштабные (главным образом релеевские) флуктуации от крупномасштабных эффектов затенения (обычно с логарифмически нормальным распределением).

Существует три основных механизма, воздействующих на распространение сигнала в системах мобильной связи.

Отражение (англ. reflection) происходит тогда, когда распространяющаяся электромагнитная волна сталкивается с гладкой поверхностью, размер которой гораздо больше длины волны радиочастотного сигнала ( $\lambda$ ).

Дифракция (англ. diffraction) встречается тогда, когда путь распространения между передатчиком и приемником преграждается

плотным телом, размеры которого велики по сравнению с  $\lambda$ , что вызывает появление вторичных волн, образующихся позади преграждающего тела. Дифракция – это явление, которое является причиной того, что распространение радиочастотной энергии от передатчика к приемнику происходит в обход пути прямой видимости между ними. Ее часто называют затенением (англ. shadowing), поскольку дифрагированное поле может достичь приемника, даже если оно затенено непроницаемой преградой.

Рассеяние (англ. scattering) встречается тогда, когда радиоволна сталкивается с любой неровной поверхностью или с поверхностью, размеры которой порядка  $\lambda$  или меньше, что приводит к распространению (рассеянию) или отражению энергии во всех направлениях. В городской местности обычные препятствия, вызывающие рассеивание сигнала, – это фонарные столбы, уличные знаки и листья. Название рассеивающий элемент (англ. scatterer) применимо к любым препятствиям на пути распространения, которые являются причиной отражения или рассеяния сигнала.

Проблемой радиопередачи между MS и BTS также является Эффект Доплера – эффект относительности, проявляющийся в сжатии/растяжении по времени импульсов (интервалов) в случае приближения/удаления источника сигнала к приемнику сигнала (и наоборот).

В случае если импульс заполнен гармонической несущей, можно говорить также об изменении частоты этой несущей.

Обычно используется выражение для частоты:

$$f_0' = f_0 \left( 1 \pm \frac{2V_{\text{объекта}}}{C} \right), \quad (2.10)$$

где  $V_{\text{объекта}}$  – относительная скорость перемещения приемника и передатчика;  $C$  – скорость волны в среде;  $f_0$  – значение частоты в условиях покоя.

Используемые в сотовой связи дециметровые радиоволны слабо огибают препятствия, т. е. распространяются в основном по прямой, но испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и подстилающей поверхности. Одним из следствий такого многолучевого распространения является более быстрое, чем в свободном пространстве, убывание интенсивности принимаемого сигнала с расстоянием. Другое следствие – замирания и искажения результирующего сигнала. Искажения результирующего сигнала, или межсимвольная интерференция, имеет место в том случае, когда более или менее

синфазные составляющие сигналы с соизмеримыми амплитудами настолько отличаются по разности хода, что символы одного сигнала «наезают» на соседние символы другого. Колебания уровня (замирания) принимаемого сигнала практически всегда имеют две составляющие – быструю и медленную. Для борьбы с быстрыми замираниями используются два основных метода: разнесенный прием, т. е. одновременное использование двух или более приемных антенн и расширение спектра.

При межсимвольной интерференции разности хода в городских условиях могут достигать единиц микросекунд. В методе CDMA, при использовании широкополосных сигналов и RAKE-приемников, наиболее сильные сигналы выравниваются по задержке и после этого складываются так, что проблема межсимвольной интерференции в значительной мере снимается. В относительно узкополосных системах сотовой связи, использующих метод TDMA, для борьбы с межсимвольными искажениями применяются эквалайзеры – адаптивные фильтры, устанавливаемые в приемном тракте цифровой обработки сигналов, которые позволяют в некоторой степени компенсировать межсимвольные искажения. Наконец, для борьбы с последствиями многолучевого распространения, а именно для устранения ошибок, обусловленных как замираниями сигналов, так и межсимвольной интерференцией, используется помехоустойчивое канальное кодирование: блочное и сверточное кодирование, а также перемежение.

Разнесенный прием (англ. diversity reception), как способ борьбы с быстрыми замираниями, заключается в совместном использовании нескольких сигналов, различающихся (разнесенных) по какому-либо параметру или координате, причем разнесение должно выбираться таким образом, чтобы вероятность одновременных замираний всех используемых сигналов была много меньше, чем какого-либо одного из них.

В принципе возможны как минимум пять вариантов разнесенного приема:

- с разнесением во времени (при этом используются сигналы, сдвинутые во времени один относительно другого; этот метод сравнительно легко реализуем лишь в цифровой форме, и улучшение качества приема размещается на пропускную способность канала связи);

- по частоте (при этом используются сигналы, передаваемые на нескольких частотах, т. е. платой является расширение используемой полосы частот);

- по углу, или по направлению (при этом прием производится на несколько антенн с рассогласованными (не полностью перекрывающимися)



диаграммами направленности; в этом случае сигналы с выходов разных антенн коррелированы тем слабее, чем меньше перекрытие диаграмм направленности, но при этом одновременно падает и эффективность приема (интенсивность принимаемого сигнала), по крайней мере для всех антенн, кроме одной);

– по поляризации (например, две антенны принимают сигналы двух взаимно ортогональных поляризаций; практического значения этот вариант не имеет, поскольку в диапазоне СВЧ замирания на разных поляризациях сильно коррелированы);

– в пространстве, т. е. с приемом сигналов на несколько пространственно-разнесенных антенн (это единственный метод, находящий практическое применение, и именно он обычно имеется в виду, когда говорят о разнесенном приеме).

Практическое применение находит простейшая система с двумя приемными антеннами, в основном в базовых станциях. В подвижных станциях сколько-нибудь широкого распространения разнесенный прием не получил.

При использовании методов разнесенного приема, т. е. приема одинаковых сигналов по нескольким каналам, появляется необходимость объединения этих сигналов с целью получить определенный выигрыш по помехоустойчивости. При этом выигрыш имеет место в двух направлениях: во-первых, в уменьшении влияния замираний сигналов; во-вторых, в увеличении отношения сигнал/шум (С/Ш) после объединения. Объединение может проводиться как до детектирования, так и после детектирования. Выигрыш в обоих случаях имеет место из-за того, что в складываемых сигналах полезная составляющая складывается синфазно, а составляющие шумов в различных разнесенных сигналах, будучи независимыми, складываются со случайными фазовыми сдвигами, т. е. «по мощности». При одинаковой мощности шумов и равенстве уровней полезных составляющих это дает выигрыш до 3 дБ.

### ***Порядок выполнения работы***

Запустите программу MATLAB и далее – Simulink.

1. Исследовать помехоустойчивость модуляции BPSK при оптимальном линейном сложении сигналов и оптимальном автовыборе:

1.1. Создать модель, показанную на рис. 2.22.

1.2. Генератор Бернулли должен производить Frame-based сигнал. Sample time = 1/1200.

1.3. В блоке AWGN Channel режим (Mode) должен быть установлен на Signal to Noise Ratio (Eb/No), Symbol period (s): 1/1200. Отношение SNR в первой ветви разнесения установить 1 db, а во второй – изменять в интервале от 1 до 10 db с шагом 1 db. Данные свести в таблицу.

1.4. Выполнить п. 1.3 при отношении SNR в первой ветви разнесения 3, 6, 9 db, а во второй – изменять в интервале от 1 до 10 db с шагом 1 db.

1.5. На основании полученных результатов в дальнейшем данные использовать для построения семейства графиков зависимости Error Rate =  $f(\text{SNR})$  для всех исследуемых моделей (всего 4 семейства для разных SNR в первой ветви). Для этого можно использовать интерфейс BERTool (новая версия Release 14).

1.6. В блоках BPSK модулятора/демодулятора формат данных должен быть переключен на двоичный (Bit).

1.7. В блоке Error Rate Calculator параметр Output data должен быть переключен на Port.

1.8. Время моделирования Simulation time: 10.

2. Исследовать помехоустойчивость BPSK при линейном сложении сигналов (рис. 2.23) и комбинированной обработке сигналов при пространственном разнесении (рис. 2.24).

3. Исследовать помехоустойчивость модуляции BPSK при многолучевом распространении сигнала со спектром Джексона:

– создать модель, показанную на рис. 2.25;

– генератор Random Integer должен производить Framebased сигнал. Sample time = 1/500000. M-ary number: 2. Samples per frame: 8;

– для четырехлучевого канала в блоке Multipath Rayleigh Fading Channel параметр Maximum Doppler shift (Hz) установить 100 для четных N и 200 – для нечетных N. Discrete path delay vector (s):  $1.0e-004 * [0 \ 0.0400 \ 0.0800 \ 0.1200]$ ; Average path gain vector (dB):  $[0 \ -3 \ -6 \ -9]$ . Установить флажок Open channel visualization at start of simulation;

– в блоке LMS Linear Equalizer установить параметры: Number of taps: 4; Signal constellation: pskmod([0:1],2); Reference tap: 2; Step size: 0.1;

– время расчета выбрать «inf»; в блоке Error Rate Calculation поставить флажок на Stop simulation и установить Target number of errors: 200, а Maximum number of symbols: 500;

– выполнить расчеты для 3, 5, 6 и т. д. лучей (количество лучей – по заданию преподавателя) и построить зависимость  $\text{BER} = f(N_{\text{path}})$ . Наблюдать изменение сигнальных созвездий до и после эквалайзера, а также все визуализируемые характеристики в блоке Visualization.

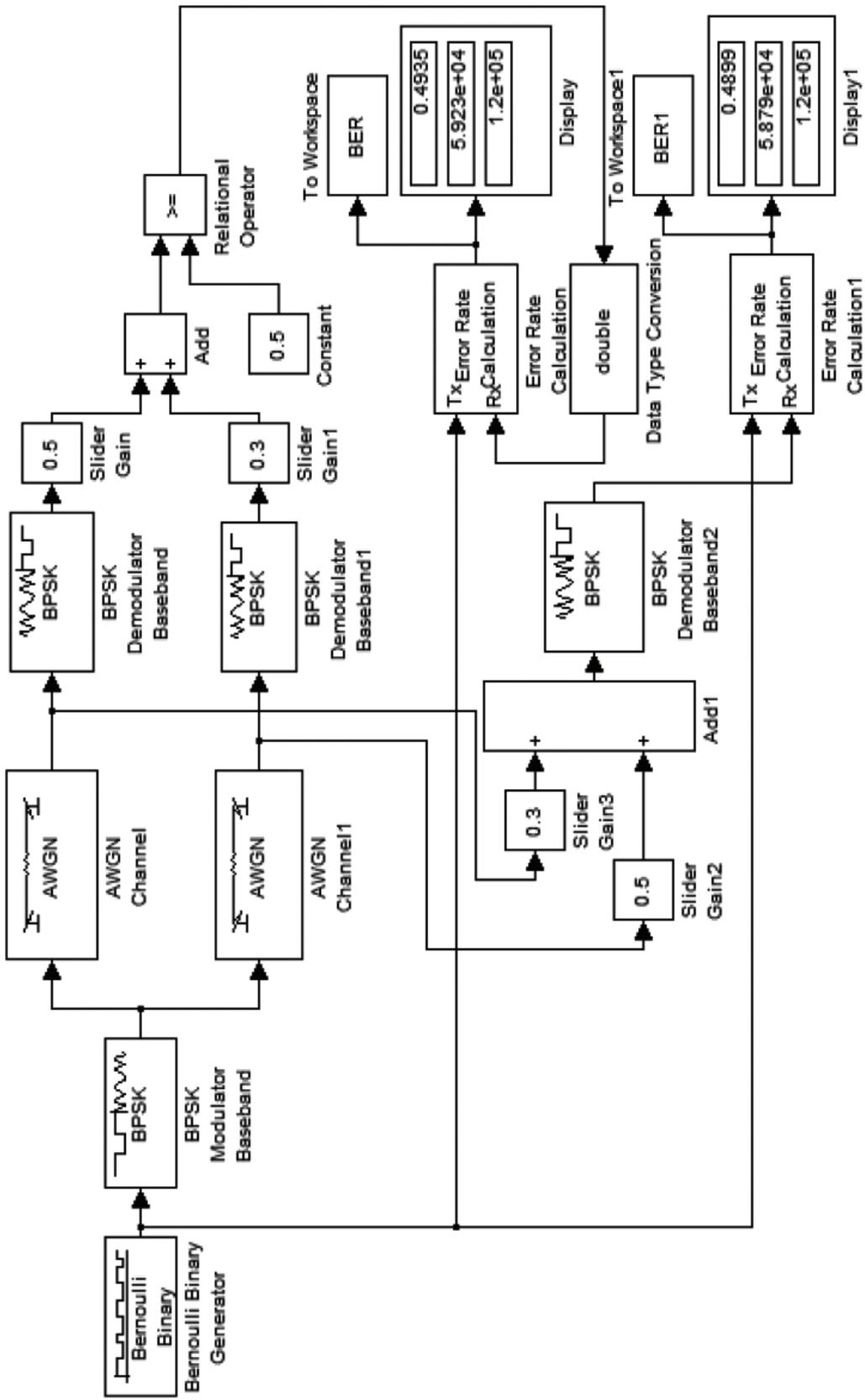


Рис. 2.22. Имитационная модель оптимального линейного сложения сигналов и оптимального автовыбора

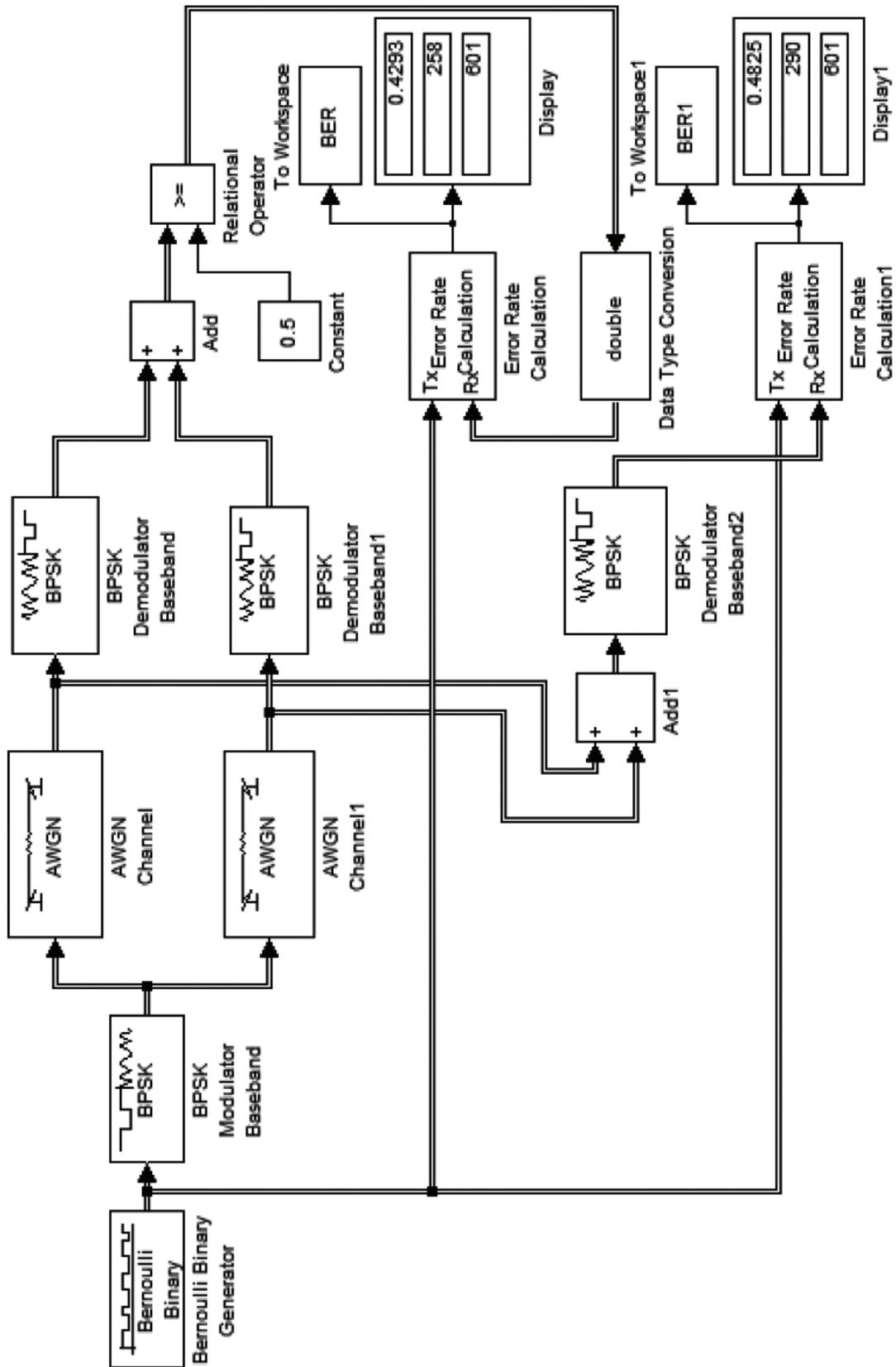


Рис. 2.23. Имитационная модель линейного сложения сигналов

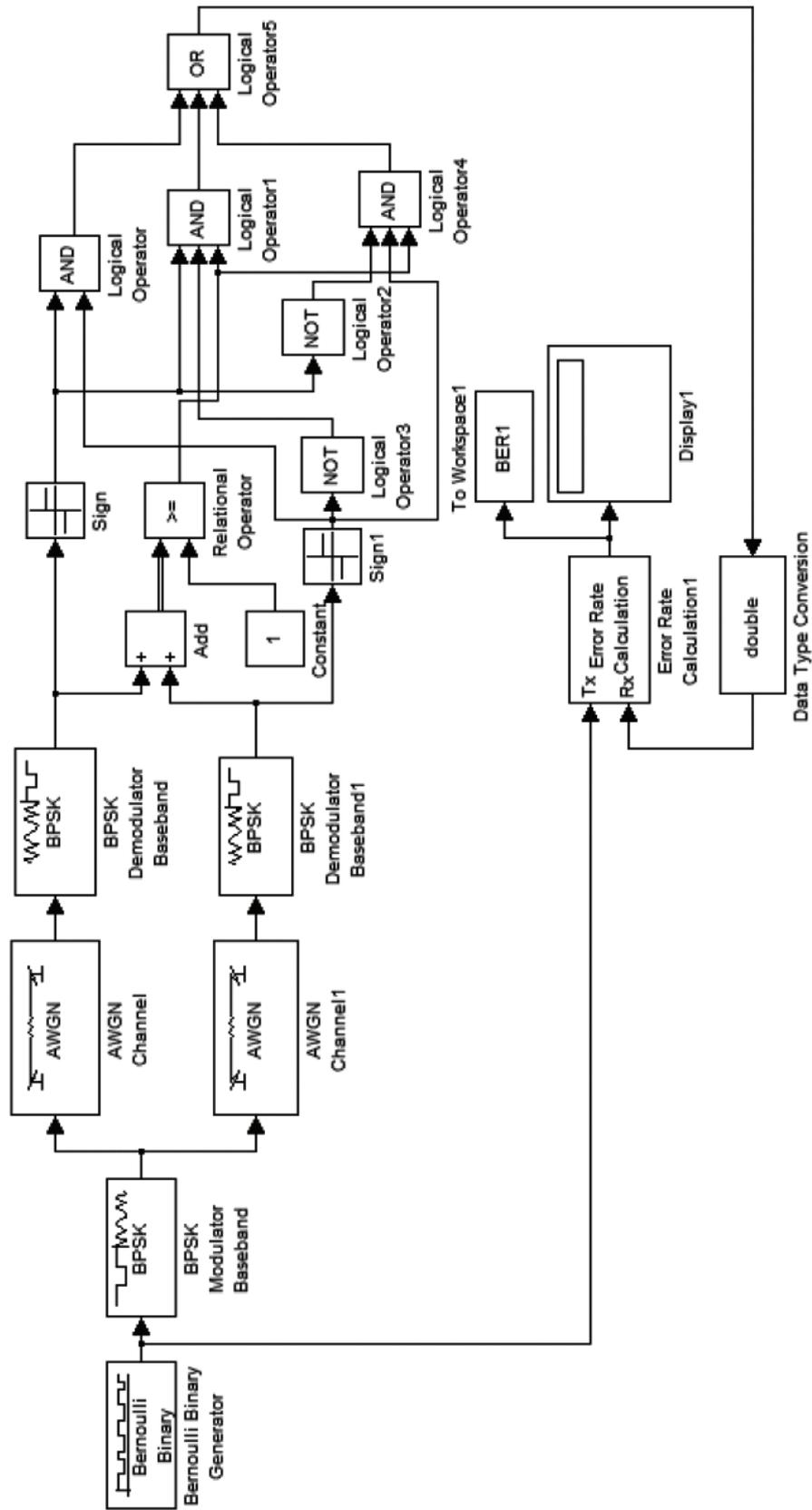


Рис. 2.24. Имитационная модель комбинированной обработки цифровых сигналов при пространственном разнесении

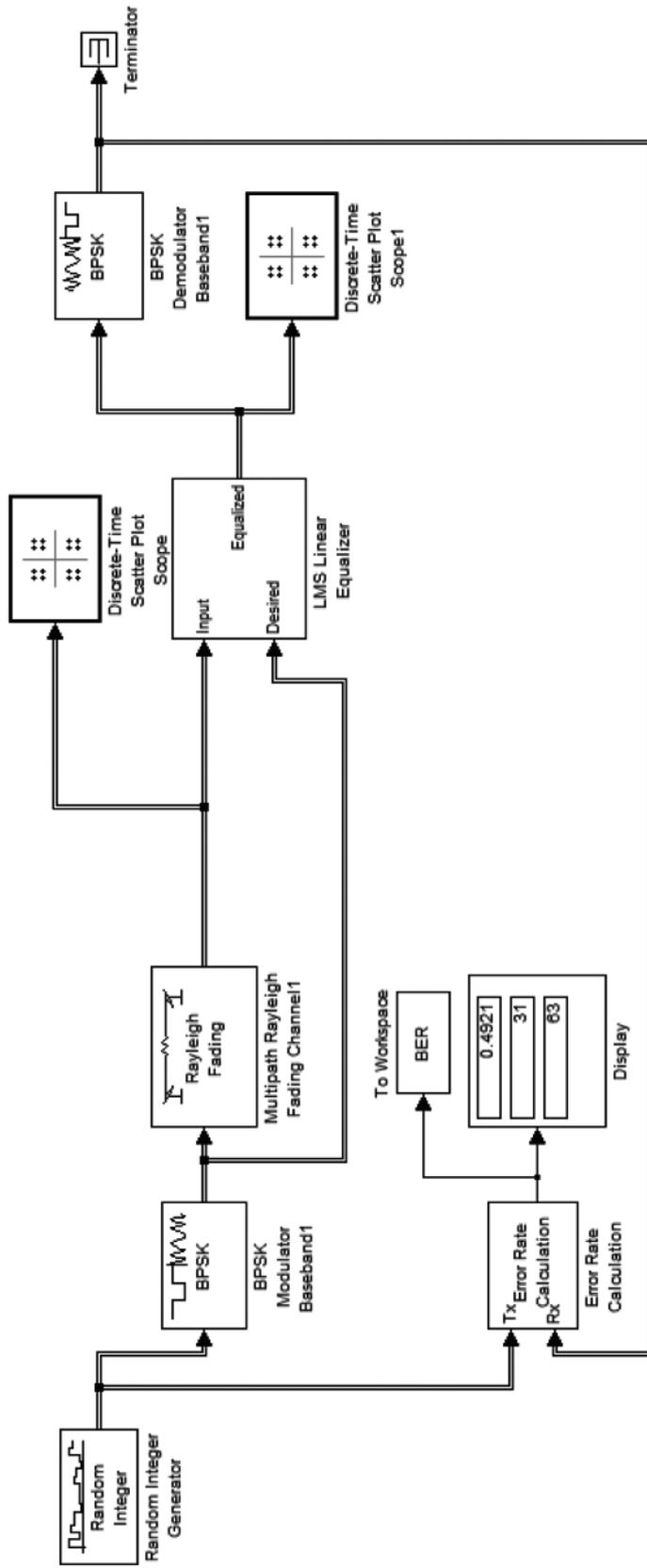


Рис. 2.25. Имитационная модель многолучевого канала

### ***Задание на лабораторную работу***

1. Создать с использованием среды MATLAB имитационные модели.
2. Построить графические зависимости для BER исследуемых моделей и проанализировать их.
3. С использованием программ Matlab (приложение 1, 2) выполнить расчеты по своему варианту для релеевского канала.

#### ***Содержание отчета***

1. Титульный лист.
2. Цель работы и задание на лабораторную работу.
3. Схема имитационных моделей.
4. Результаты наблюдений, вычислений, графики и диаграммы.
5. Выводы по полученным данным.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какой параметр характеризует помехоустойчивость системы цифровой связи?
2. В чем заключается принципиальная разница между системами цифровой и аналоговой связи?
3. Какая характеристика системы связи измеряется вероятностью ошибки?
4. Вероятность ошибки должна быть существенно ниже в системах передачи речевых сигналов или в системах передачи данных?
5. В чем принципиальная разница между замираниями и помехами (шумами)?
6. Назовите основные методы разнесения при разнесенном приеме.
7. Каким образом воздействуют на полезный сигнал аддитивные и мультипликативные помехи?
8. Какой вид модуляции применяется в изучаемых моделях?
9. Поясните характеристики, визуализируемые в блоке Multipath Rayleigh Fading Channel.
10. Какой полезный эффект дает возможность создания подсистем?
11. В чем заключается основное преимущество маскированной подсистемы по сравнению с обычной подсистемой?

# 3

## ПРОГРАММИРОВАНИЕ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ

### 3.1. Представление сетей радиосвязи графами

*Сеть сотовой связи* представляет собой совокупность приемопередающих станций, обслуживающих определенную территорию.

*Модуль сети радиосвязи* – расстояние между соседними станциями сети сотовой структуры.

*Координационное расстояние  $D$*  – расстояние между станциями, работающими в одном частотном канале.

*Радиус зоны обслуживания* – область, в которой обеспечивается прием сигналов с заданным качеством.

*Граф сети радиосвязи* – граф, вершины которого соответствуют пунктам установки передающих станций, а ребрами соединены те передатчики, которые создают помехи приему в соответствующей зоне обслуживания друг друга.

Поскольку распространение радиоволн одинаково во всех направлениях, ребра графа сети связи являются неориентированными, однократными и без петель. То есть граф сети связи – простой.

Сота представляет собой шестиугольник. Модуль сети вычисляется как расстояние между центрами смежных шестиугольников, а радиус зоны обслуживания – расстояние от центра шестиугольника до вершины.

#### **Построение графа связи с помощью координационных колец**

*Идея алгоритма.* Задано расположение станций на местности, рабочие частоты, координационное расстояние  $D$ . Строим вокруг первой станции окружность радиуса  $D$ . Для всех станций, попавших внутрь круга, проверяем, совпадают ли их рабочие частоты с частотой первой станции. Если частоты совпадают, то соответствующие данным станциям вершины в графе связи соединяем ребром с первой вершиной. Повторяем все вышеописанные действия для остальных станций.

### Построение графа связи с помощью матриц

*Идея алгоритма.* Задано расположение станций на местности, рабочие частоты, координационное расстояние  $D$ . Формируем матрицу  $T$  такую, что  $t_{ij} = 1$  ( $i \neq j$ ), если рабочие частоты станций  $i$  и  $j$  совпадают, и  $t_{ij} = 0$  при  $i = j$  или при несовпадении частот. Вычисляем расстояния между станциями с одинаковыми частотами ( $t_{ij} = 1$ ) и на основе матрицы  $T$  формируем матрицу  $A$ , у которой элемент  $a_{ij}$  равен 1, если станции  $i$  и  $j$  ( $i \neq j$ ) имеют одинаковые частоты (т. е.  $t_{ij} = 1$ ) и расстояние между ними не больше координационного. Во всех остальных случаях  $a_{ij} = 0$ . Полученная матрица  $A$  – матрица смежности графа сети связи.

## 3.2. Лабораторная работа № 7 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ НА ЯЗЫКЕ C++

*Цель работы:* расчет взаимовлияния базовых станций и построение графа сети радиосвязи на одном из языков программирования.

### Порядок выполнения работы

ПРИМЕР 3.1. Структура сети сотовой связи показана на рис. 3.1 (масштаб – 1 клетка = 1 км). Координационное расстояние равно 5 км, рабочие частоты станций удовлетворяют условиям:  $f_1 = f_4$ ,  $f_2 = f_3 = f_5$ ,  $f_6 = f_7 = f_8$ . Построить граф сети связи и задать его матрицей смежности  $A(G)$ .

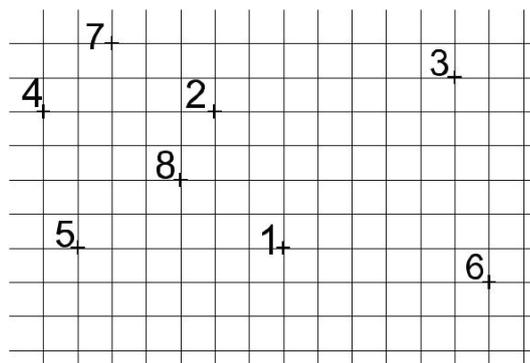


Рис. 3.1. Структура сети сотовой связи

*Решение*

**Построение графа связи с помощью координационных колец**

Шаг 1. Вокруг каждой станции строятся окружности радиусом, равным координационному расстоянию, в нашем случае 5 км. На рис. 3.2 приведен пример координационного кольца для станции 8.

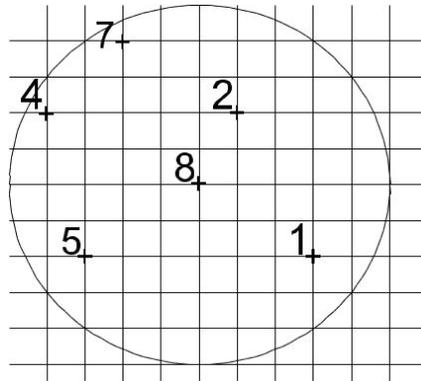


Рис. 3.2. Координационное кольцо

Шаг 2. Станции, лежащие внутри данного кольца, могут создавать помехи для станции 8, если работают с ней на одной частоте. Поэтому проверяем, какие частоты принадлежат станциям, лежащим внутри кольца. В данном случае станции 7 и 8 имеют одинаковые рабочие частоты, следовательно, оказывают друг на друга мешающее влияние. Ребром соединяем вершины 7 и 8.

Шаг 3. Аналогичные операции выполняются и для остальных станций сети. В результате построения колец и анализа помех, новых ребер в нашем случае не обнаруживается. Следовательно, получаем граф связи, изображенный на рис. 3.3.

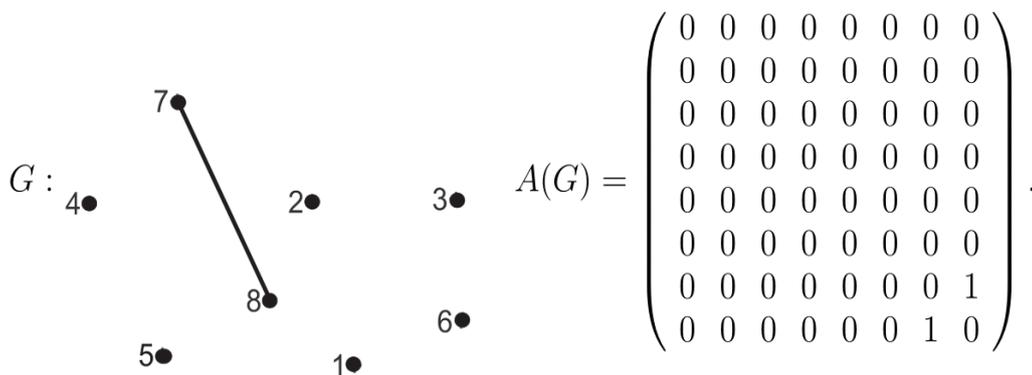


Рис. 3.3. Граф связи

*Замечание.* На рисунке, задающем граф сети связи, нет необходимости соблюдать порядок расположения вершин, соответствующий реальной сети, и выдерживать расстояния. Наличие помех отмечается ребрами.

### Построение графа связи с помощью матриц

Анализируя условия, связывающие частоты, строим матрицу  $T$ :

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица симметрична, для построения матрицы смежности  $A(G)$  достаточно вычислить расстояния между станциями, которым соответствуют единицы в треугольнике над диагональю матрицы  $T$ :

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boxed{1} & 0 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & \boxed{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \boxed{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$\rho(1,4) = \sqrt{7^2 + 4^2} = \sqrt{65} \approx 8,06 > 5, \Rightarrow a_{1,4} = a_{4,1} = 0;$$

$$\rho(2,3) = \sqrt{7^2 + 1^2} = \sqrt{50} \approx 7,07 > 5, \Rightarrow a_{2,3} = a_{3,2} = 0;$$

$$\rho(2,5) = \sqrt{4^2 + 4^2} = \sqrt{32} \approx 5,65 > 5, \Rightarrow a_{2,5} = a_{5,2} = 0;$$

$$\rho(3,5) = \sqrt{11^2 + 5^2} = \sqrt{136} \approx 11,66 > 5, \Rightarrow a_{3,5} = a_{5,3} = 0;$$

$$\rho(6,7) = \sqrt{11^2 + 7^2} = \sqrt{170} \approx 13,03 > 5, \Rightarrow a_{6,7} = a_{7,6} = 0;$$

$$\rho(6,8) = \sqrt{9^2 + 3^2} = \sqrt{90} \approx 9,48 > 5, \Rightarrow a_{6,8} = a_{8,6} = 0;$$

$$\rho(7,8) = \sqrt{2^2 + 4^2} = \sqrt{20} \approx 4,47 < 5, \Rightarrow a_{7,8} = a_{8,7} = 1.$$

$$A(G) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

*Замечание.* Расстояния в сотовой сети будем вычислять следующим образом. Все станции можно разбить на группы, элементы которых равноудалены от начальной станции  $A_0$ , т. е. расположены на окружности с центром  $A_0$  определенного радиуса (рис. 3.4).

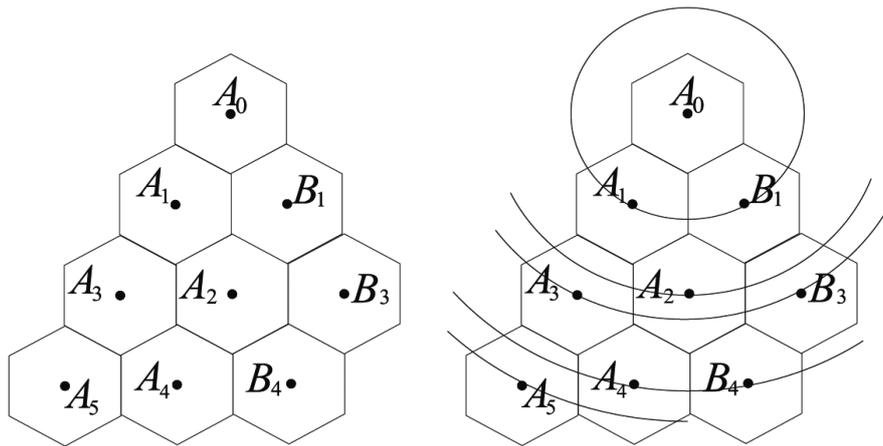


Рис. 3.4. Разбиение станций на группы

В правильном шестиугольнике со стороной  $a$  расстояние от центра до вершины равно  $a$ , а расстояние от центра до стороны равно  $a\sqrt{3}/2$  (высота правильного треугольника).

В сети сотовой связи с модулем  $R_0$  длина стороны вычисляется по формуле  $a = R_0 / \sqrt{3}$  (рис. 3.5).

Вычислим расстояние от центра верхнего шестиугольника  $A_0$  до центров остальных. Заметим, что  $|A_0A_1| = |A_0B_1|$ ,  $|A_0A_3| = |A_0B_3|$ ,  $|A_0A_4| = |A_0B_4|$ .

1. Расстояние между  $A_0$  и  $A_1$  равно модулю сети  $R_0$  (рис. 3.5, а).

2. Расстояние между  $A_0$  и  $A_2$  равно  $R_0\sqrt{3}$  (рис. 3.5, б).
3. Расстояние между  $A_0$  и  $A_3$  равно  $2R_0$  (рис. 3.5, в).
4. Расстояние между  $A_0$  и  $A_4$  найдем по теореме косинусов (рис. 3.5, г).

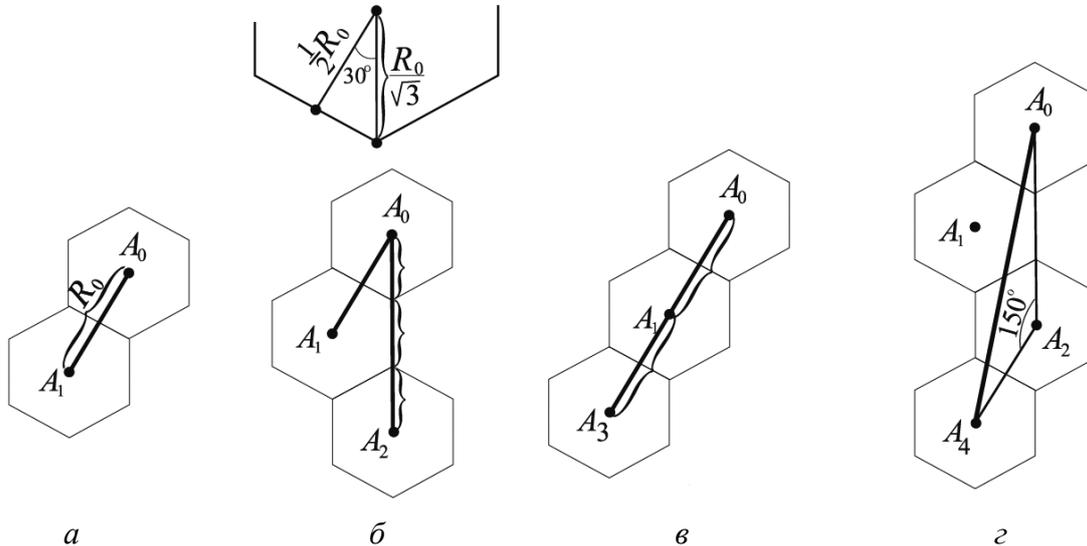


Рис. 3.5. Расстояния в сотовой сети между центром верхнего шестиугольника  $A_0$  и центрами остальных:  
 $a - A_1$ ;  $б - A_2$ ;  $в - A_3$ ;  $г - A_4$

$$\begin{aligned}
 |A_0A_4| &= \sqrt{|A_0A_2|^2 + |A_2A_4|^2 - 2|A_0A_2| \cdot |A_2A_4| \cdot \cos 150^\circ} = \\
 &= \sqrt{3R_0^2 + R_0^2 + 2\sqrt{3}R_0^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = \sqrt{7}R_0.
 \end{aligned}$$

Если координационное расстояние достаточно большое, то необходимо рассматривать более крупный фрагмент сети, но принцип вычисления расстояний будет тот же.

**ПРИМЕР 3.2.** Фрагмент однородной сотовой сети представлен на рис. 3.6. Радиус зоны обслуживания (радиус окружности, описанной вокруг шестиугольника) равен 4 км, координационное расстояние равно 18,3 км. Определить, какие из указанных базовых станций могут оказывать мешающее влияние на базовую станцию 1.

*Решение*

Шаг 1. Зная радиус зоны обслуживания, определяется модуль сети:

$$R_0 = R_{\text{зоны}} \cdot \sqrt{3} = 4\sqrt{3} \approx 6,93 \text{ км.}$$

Шаг 2. Определяется расстояние  $R_1$  до ближайших станций 2, 3, 4, 5, 6, 7. Оно равно модулю сети

$$R_1 = 4\sqrt{3} \approx 6,93 \text{ км.}$$

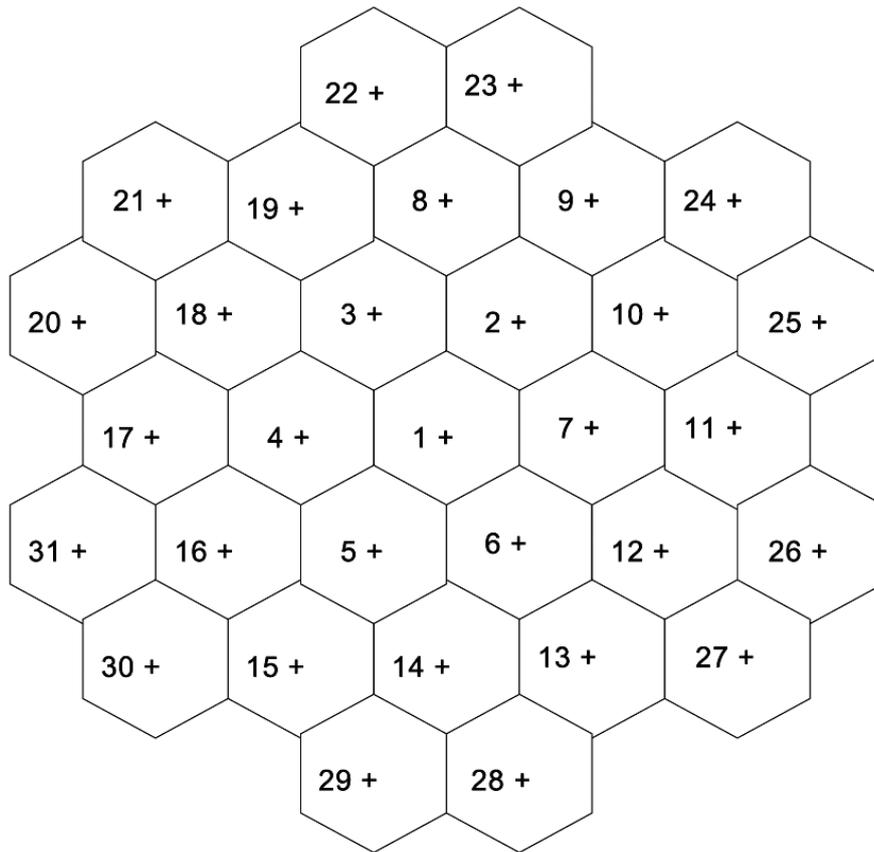


Рис. 3.6. Фрагмент однородной сотовой сети

Шаг 3. Определяем расстояние  $R_2$  до станций 8, 10, 12, 14, 16, 18:

$$R_2 = R_0\sqrt{3} = 4\sqrt{3}\sqrt{3} = 12 \text{ км.}$$

Шаг 4. Определяем расстояние  $R_3$  до станций 9, 11, 13, 15, 17, 19:

$$R_3 = 2R_0 = 8\sqrt{3} \approx 13,86 \text{ км.}$$

Шаг 5. Определим расстояние  $R_4$  до станций 21, 23, 25, 27, 29, 31:

$$R_4 = \sqrt{7}R_0 = \sqrt{7} \cdot 4\sqrt{3} = 4\sqrt{21} \approx 18,33 \text{ км.}$$

Расстояние  $R_4$  больше координационного. В результате получаем часть графа связи, характеризующую станцию 1 (рис. 3.7).



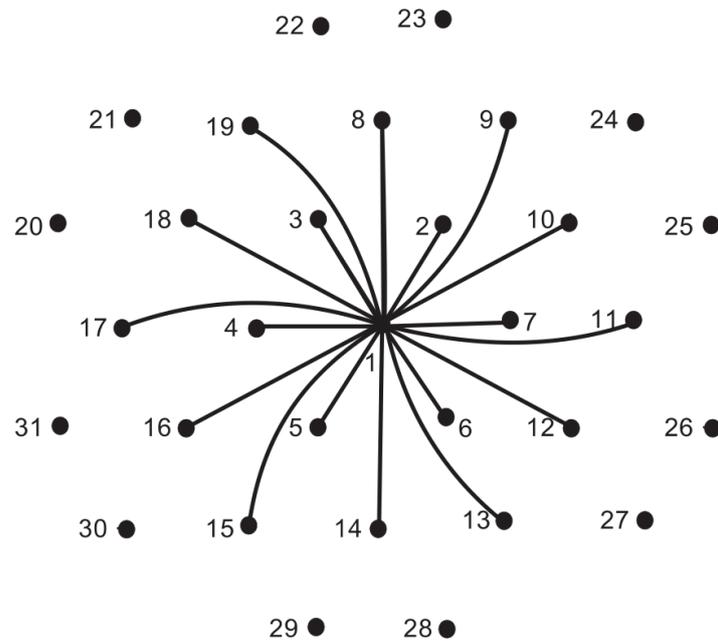


Рис. 3.7. Часть графа связи, характеризующая станцию 1

Для того, чтобы построить граф всей сети, необходимо проанализировать мешающее влияние всех станций друг на друга. Очевидно, что для каждой станции мешающие будут располагаться таким же характерным «веером», как для станции 1.

### ***Задание на лабораторную работу***

В соответствии с примерами 3.1 и 3.2 выполнить нижеприведенные задания в соответствии со своим вариантом. Построить необходимые схемы и матрицы, написать алгоритм решения задачи и запрограммировать.

1. Сеть радиосвязи состоит из восьми станций, расположение которых показано на рис. 3.8, *а*. Координационное расстояние равно 4 км, рабочие частоты всех станций одинаковы. Построить для данной сети граф.

2. Сеть радиовещания состоит из пяти передающих станций, ее структура показана на рис. 3.8, *б* (масштаб – 1 клетка = 1 км). Координационное расстояние равно 4 км, рабочие частоты всех станций одинаковы. Построить граф сети.

3. Для радиопокрытия города N установлено восемь базовых станций (рис. 3.8, *в*). Координационное расстояние равно 9 км, рабочие частоты станций следующие:  $f_1 = f_4, f_2 = f_3 = f_5, f_6 = f_7 = f_8$ . Определить матрицу смежности и построить граф сети.

4. Сеть радиовещания состоит из шести передающих станций (рис. 3.8, *з*). Координационное расстояние равно 18 км, рабочие частоты всех станций одинаковы. Построить для данной сети граф.

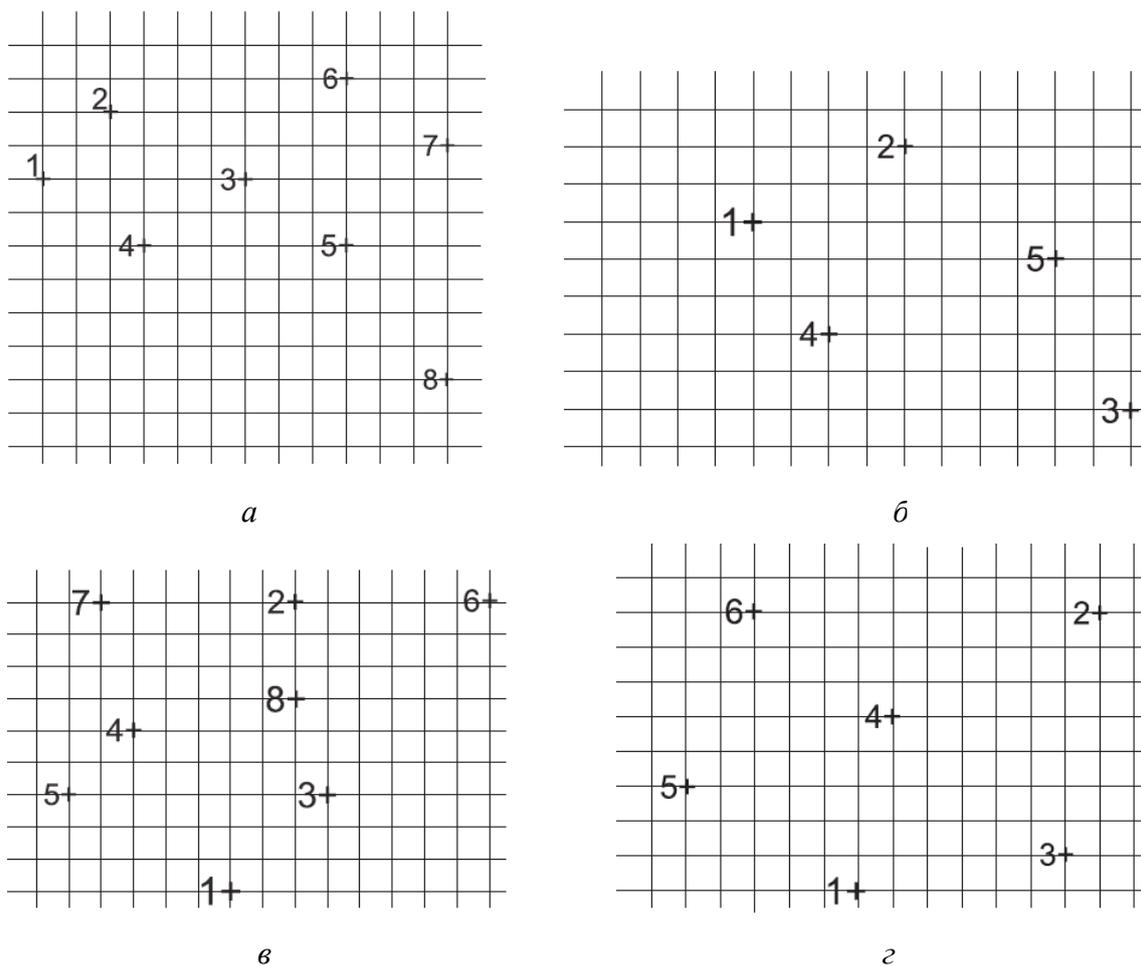


Рис. 3.8. Расположение станций сети радиосвязи в масштабе, км:  
*a* – 1; *б* – 2; *в* – 1,5; *з* – 3

5. Структура сети радиовещания показана на рис. 3.9, *а*. Радиус зоны обслуживания равен 38 км, координационное расстояние равно 114 км. Определить, будут ли указанные станции оказывать взаимные влияния друг на друга, построить граф сети и матрицу смежности.

6. В городе N установлены 15 базовых станций (рис. 3.9, *б*). Радиус зон покрытия базовых станций равен 3,5 км, координационное расстояние  $D = 18,2$  км. Определить, будут ли станции сети оказывать взаимные влияния друг на друга, построить граф сети и матрицу смежности.

7. Структура сети сотовой связи города  $N$  представлена на рис. 3.9, *в*. Радиус зон покрытия базовых станций равен 1,6 км, координационное расстояние равно 10 км. Определить, какие станции будут оказывать взаимные влияния друг на друга, и построить граф сети.

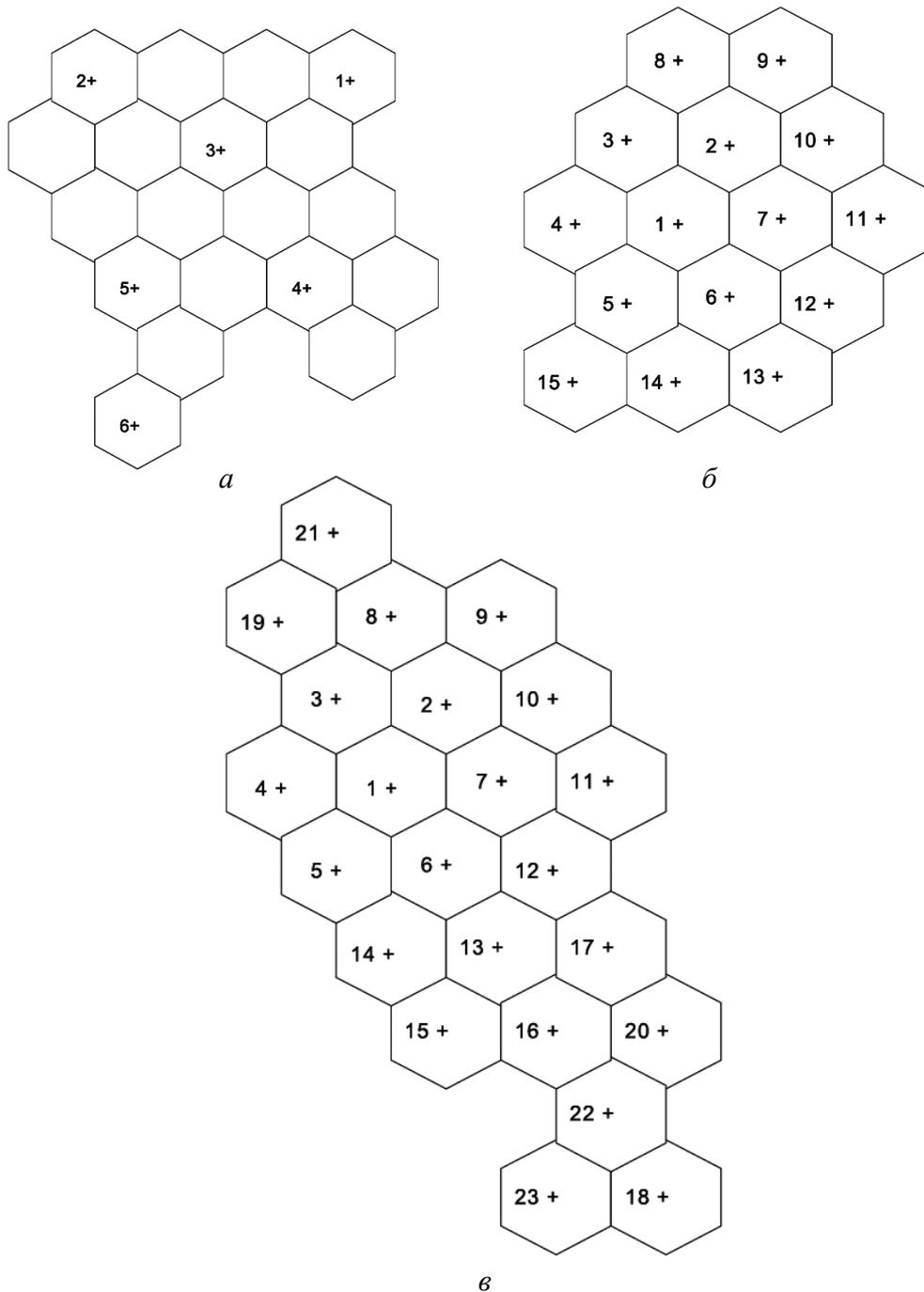


Рис. 3.9. Структура сети:  
*a* – радиовещания; *б* – с 15 базовыми станциями; *в* – города  $N$

### ***Содержание отчета***

1. Титульный лист.
2. Цель работы и задание на лабораторную работу.
3. Графическая схема имитационных моделей.
4. Алгоритм.
5. Программный код.
6. Полученные результаты и выводы по полученным данным.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что представляет собой сеть сотовой связи?
2. Что такое модуль сети радиосвязи?
3. Что называют координационным расстоянием в планировании мобильных сетей?
4. Что такое радиус зоны обслуживания?
5. Как строится граф сети радиосвязи и задается его матрица?
6. Объясните назначение координационных колец.

The Matlab code for generating Rayleigh random sequence with a Doppler frequency of 100 Hz.

```

clear all;
close all;
N=32;
fm=100;
df=(2*fm)/(N-1);
fs=10*fm;
M=(fs/df)+1;
T=1/df;
Ts=1/fs;
g=randn(1,N/2)+j*randn(1,N/2);
gc=conj(g);
g1=[fliplr(gc), g];
g=randn(1,N/2)+j*randn(1,N/2);
gc=conj(g);
g2=[fliplr(gc), g];
f=-fm:df:fm;
S=1.5./(pi*fm*sqrt(1-(f/fm).^2));
S(1)=2*S(2)-S(3);
S(end)=2*S(end-1)-S(end-2);
X=g1.*sqrt(S);
X=[zeros(1,(M-N)/2), X, zeros(1,(M-N)/2)];
x=abs(fft(X));
Y=g2.*sqrt(S);
Y=[zeros(1,(M-N)/2), Y, zeros(1,(M-N)/2)];
y=abs(fft(Y));
r=sqrt(x.^2+y.^2);
t=0:Ts:T;
plot(t,10*log10(r/mean(r)))
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Signal Amplitude (dB)')
  
```



### Matlab simulation: the program 2

```
clear;
clc;
N=5000;
t=0.0001:10/N:10;
fc=900*10.^6;
wc=2*pi*fc;
v=30/3600;
c=300*10^3;
wm=wc*(v/c);
fm=wm/(2*pi);
for i=1:N
A(i)=(2*pi/N)*i;
wn(i)=wm*cos(A(i));
O(i)=(pi*i)/(N+1);
xc(i)=2*cos(wn(i)*t(i)).*cos(O(i))+cos(wm*t(i));
xs(i)=2*cos(wn(i)*t(i)).*sin(O(i));
T(i)=(1/(2*N+1)^0.5).*(xc(i)+j*xs(i));
end
M=mean(abs(T));
MdB=20*log10(M);
TdB=floor(20*log10(abs(T)));
z1=hist(abs(T));
z=hist(TdB,9);
n=0;
for k=1:9
n=n+z(k);
end
for j=1:9
P(j)=z(j)/n;
end
```

```
f(1)=P(1);
    for x=2:9
        f(x)=f(x-1)+P(x);
        F(10-x)=f(x);
    end
end
plot(z1)
title('Rayleigh's distribution');
pause
semilogy(t,abs(T)/max(abs(T)), 'r')
title('Received field');
ylabel('Received field intensity');
xlabel('time');
grid on
pause
loglog(100*F, 'm');
title('Probability of exceed a given attenuation (%)')
```



1. Бабков, В. Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учеб. пособие для вузов / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, П. А. Михайлов. – 3-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 222 с.
2. Технологии мобильной связи: услуги и сервисы / А. Г. Бельтов [и др.]. – М.: Инфра-М, 2015. – 206 с.
3. Берлин, А. Н. Цифровые сотовые системы связи / А. Н. Берлин. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
4. Веселовский, К. Системы подвижной радиосвязи / К. Веселовский; под ред. А. И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.
5. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие для вузов / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
6. Галкин, В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов / В. А. Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.
7. Гельгор, А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А. Л., Попов Е. А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.
8. Громаков, Ю. Я. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю. А. Громаков. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 237 с.
9. Системы мобильной связи: учеб. пособие для вузов / В. П. Ипатов [и др.]; под ред. В. П. Ипатова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 272 с.
10. Карташевский, В. Г. Сети подвижной связи / В. Г. Карташевский, С. Н. Семенов, Т. В. Фирстова. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 299 с.
11. Лохвицкий, М. С. Сотовая связь: от поколения к поколению / М. С. Лохвицкий, Н. С. Мардер. – М.: ИКАР, 2014. – 236 с.
12. Маковеева, М. М. Системы связи с подвижными объектами: учеб. пособие для вузов / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
13. Элементы теории графов: учеб. пособие / В. И. Носов [и др.]. – Новосибирск: СибГУТИ, 2008. – 107с.
14. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
15. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.



|   |     |
|---|-----|
| Введение.....   | 3   |
| 1. Работа в программном пакете RPS-2 .....  | 5   |
| 1.1. Краткие сведения по моделированию систем радиосвязи  | 5   |
| 1.2. Возможности пакета RPS-2 .....   | 9   |
| 1.3. Моделирование систем связи в RPS-2.....  | 11  |
| 1.4. Интерфейс RPS-2 .....  | 12  |
| 1.5. Лабораторная работа № 1. Частотно-территориальное<br>планирование сети GSM-900 .....   | 15  |
| 1.6. Лабораторная работа № 2. Изучение моделей<br>распространения радиосигналов .....   | 25  |
| 1.7. Лабораторная работа № 3. Изучение методов расчета<br>параметров радиосетей.....  | 34  |
| 2. Работа в среде MATLAB и пакете прикладных программ Simulink  | 47  |
| 2.1. Интерфейс среды MATLAB .....   | 47  |
| 2.2. Моделирование динамических систем с использованием<br>инструментального приложения Simulink .....                                  | 50  |
| 2.3. Лабораторная работа № 4. Цифровая модуляция<br>в системах мобильной связи. GMSK-модулятор.....                                     | 54  |
| 2.4. Лабораторная работа № 5. Цифровая модуляция<br>в системах мобильной связи. QPSK-модулятор.....                                     | 63  |
| 2.5. Лабораторная работа № 6. Анализ помехоустойчивости<br>системы цифровой связи при наличии помех и замираний<br>в канале связи ..... | 78  |
| 3. Программирование сетей радиосвязи .....  | 90  |
| 3.1. Представление сетей радиосвязи графами.....  | 90  |
| 3.2. Лабораторная работа № 7. Проектирование сетей<br>радиосвязи на языке C++ .....   | 91  |
| Приложение 1 .....  | 101 |
| Приложение 2 .....  | 102 |
| Литература .....  | 104 |

Учебное издание

**Буснюк Николай Николаевич**  
**Мельянец Геннадий Иванович**

**СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Лабораторный практикум

Редактор *Ю. Д. Нежикова*  
Компьютерная верстка *Е. В. Ильченко*  
Корректор *Ю. Д. Нежикова*

Издатель:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.