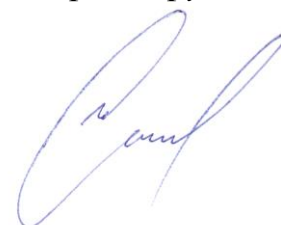


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С.О. МАКАРОВА»

На правах рукописи



СКОВПИН Михаил Сергеевич

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ
СОТОВОЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор ЛАПШИНА М.Л.

ВОРОНЕЖ 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Системы автоматизированного проектирования радиосетей	11
1.1. Общие принципы построения радиоэлектронных систем	11
1.1.1. Классификация радиоэлектронных средств и систем	11
1.1.2. Современные системы сотовой связи	12
1.1.3. Проектирование сетей сотовой связи	15
1.1.3.1. Развитие подходов к планированию сетей радиосвязи	15
1.1.3.2. Радиоконтроль за излучениями радиоэлектронных средств	21
1.1.3.3. Задача синтеза оптимальной архитектуры сети	23
1.2. Программные комплексы планирования радиосетей	26
1.3. Постановка задачи исследования	39
2. Многокритериальный подход к управлению частотно-территориальным планированием сетей сотовой связи	42
2.1. Общий подход и принципы многокритериальной оптимизации	42
2.2. Постановка задачи планирования на основе моделей многокритериального выбора	43
2.3. Выбор показателей качества	45
2.4. Выбор критериев оптимальности	47
2.5. Формирование множества допустимых вариантов системы	49
2.6. Нахождение Парето-оптимальных вариантов системы	51
2.7. Методы нахождения оптимальных вариантов построения сети	52
2.7.1. Направленные (прямые) методы	52
2.7.2. Применение метода исследования пространства параметров	54
2.7.3. Использование метаэвристик	60
2.7.3.1. Многокритериальная оптимизация с помощью генетических алгоритмов	60
2.7.3.2. Оптимизация проектных решений при планировании радиосетей	66
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	68
3. Математическое моделирование систем сотовой связи	70

3.1. Определение параметров, используемых при проектировании	70
3.2. Особенности планирования сетей LTE	75
3.3. Модели влияния распространения радиоволн на эффективность системы	81
3.3.1. Моделирование потерь распространения сигнала	81
3.3.2. Модель учета влияния рельефа местности на зону покрытия одиночного источника и системы в целом	90
3.4. Моделирование зоны покрытия	95
3.5. Выбор оптимального проектного варианта сети сотовой связи	99
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	104
4. Использование разработанных методик и алгоритмов частотно- территориального планирования в программном комплексе	106
4.1. Программный комплекс планирования сетей сотовой связи	106
4.1.1. Общие сведения о комплексе	106
4.1.2. Функциональное назначение комплекса	106
4.1.3. Описание логической структуры комплекса	107
4.1.4. Организация пользовательского интерфейса комплекса частотно- территориального планирования	110
4.2. Планирование сотовой сети мобильной связи стандарта GSM-1800	116
4.3. Подсистема автоматизации проектирования сетей LTE	124
4.4. Анализ эффективности разработанных методик	128
ВЫВОДЫ	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
Список литературы	142
Приложение П1. Акт внедрения (ЦСИР АО «НТЦ РЭБ»)	154
Приложение П2. Акт внедрения в учебный процесс (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова)	155
Приложение П3. Свидетельство на программу для ЭВМ	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время объемы информации, необходимой человечеству для хозяйственной, культурной, научной и другой деятельности переживают эпоху быстрого роста. Одну из самых важных ролей в обеспечении обмена информацией играют различные системы радиосвязи, системы связи между подвижными объектами, спутниковые системы связи, радиотехнические системы извлечения информации и радиоуправления. Важнейшими характеристиками радиосистем, определяющими их конкурентоспособность на мировом рынке, являются зона действия, точность получаемой информации, быстродействие, надежность и помехоустойчивость, пропускная способность, потребляемая мощность и перспективность, то есть способность в течение длительного времени удовлетворять потребности пользователей.

Основными направлениями в совершенствовании систем радиосвязи являются использование новых физических принципов функционирования, интеллектуализация на основе современной компьютерной техники, повышение роли устройств обработки информации, расширение применяемого диапазона радиоволн и условий функционирования.

Создание высокоэффективных радиосистем связано с решением ряда задач анализа и синтеза, учитывающих возможные состояния функционирования. За последние 15 лет огромный успех мобильных телефонных систем послужил стимулом для развития технологий и внес большой вклад в подходы к математическому моделированию и алгоритмы оптимизации проектирования и принятия управленческих решений. На этапе строительства и эксплуатации телекоммуникационной сети оператор заинтересован в том, чтобы сеть соответствовала необходимым критериям надежности и качества предоставляемых услуг. Задача выбора наилучшего варианта телекоммуникационной сети на этапе проектирования в условиях ограниченного финансирования является наиболее типичной.

Современные телекоммуникационные сети становятся все более сложными, к ним предъявляются противоречивые технико-экономические требования,

которые характеризуются совокупностью показателей качества. Как правило, показатели качества зависимы между собой и являются антагонистическими. Телекоммуникационную сеть, как один из видов сложной информационной системы, можно представить упорядоченным набором элементов, свойств и их соотношений. Их конкретное задание определяет структуру, параметры и эффективность сети.

Как правило, существует некоторое множество допустимых проектных решений и необходимо выбирать наилучшие (оптимальные по заранее заданному критерию) в задачах долгосрочного планирования и проектирования телекоммуникационных сетей, а также краткосрочного планирования и ситуативного управления с учетом совокупности показателей качества. Поэтому актуальным является применение методов многокритериальной оптимизации для принятия оптимальных проектных решений.

Вопросы частотно-территориального планирования различных видов телекоммуникационных сетей и организации радиосвязи рассматривались в своих работах известными российскими специалистами, такими как Цимбал В.А. [90, 91], Бабков В.Ю. [7, 5], Самойлов А.Г. [65, 55], Румянцев К.Е. [29] и другими, а так же зарубежными авторами – Мишра А.Р. [101, 116, 115], Шевалир К. [96], Гарг В.К. [103, 102].

Проведенный анализ современных методов планирования сетей радиосвязи показал, что задачи проектирования не ставятся как многокритериальные задачи оптимизации с учетом совокупности противоречивых технических и экономических требований. Полученные в результате проектные варианты не являются оптимальными по совокупности показателей качества, что приводит к необходимости перепланировок данных сетей после введения их в эксплуатацию и проведения мониторинга.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования продиктована необходимостью развития математического и программного обеспечения, предназначенного для оптимизации проектных вариантов при частотно-

территориальном планировании сетей радиосвязи со строгим учетом показателей качества на основе методов многокритериальной оптимизации.

Создание проблемно-ориентированных комплексов автоматизированного проектирования радиосетей базируется на двух основных направлениях. Первое из них – это выбор оптимальных проектных вариантов с учетом совокупности показателей качества с помощью методов многокритериальной оптимизации. Второе заключается в реализации этих методов на ЭВМ и разработке соответствующих пакетов программ.

Тематика диссертационной работы соответствует одному из научных направлений ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» «Разработка средств проектирования и управления технических и организационных систем, в том числе специального назначения».

Объект исследования. Методы автоматизации процесса оптимального частотно-территориального проектирования сетей радиосвязи.

Предмет исследования. В работе рассматриваются модели, методы, алгоритмы и методики частотно-территориального планирования сетей радиосвязи.

Цель исследования. Целью работы является повышение эффективности частотно-территориального проектирования систем радиосвязи в условиях ограниченных ресурсов.

Научная задача. Разработка научно-методического аппарата автоматизированного оптимального частотно-территориального планирования сетей радиосвязи.

Методы исследования. В работе использовались методы математического моделирования, методы оптимизации, теория управления, методы эволюционного моделирования, объектно-ориентированное программирование.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: п. 3 «Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры

сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них устройств», п. 11 «Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования», а также п. 14 «Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

Научная новизна. В диссертации получены характеризующиеся научной новизной результаты:

- предложены и обоснованы методы выбора оптимальных проектных вариантов построения сети сотовой связи с учетом совокупности показателей качества, основанные на оптимальности по Парето;

- впервые разработана синтезированная гибридная методика поиска оптимального решения задачи частотно-территориального планирования сети сотовой связи как задачи векторной (многокритериальной) оптимизации;

- предложены модификации моделей распространения радиосигналов и определения зоны прямой видимости, позволяющие применение их в процедурах эволюционного моделирования;

- разработана методология автоматизации проектирования сети радиосвязи, позволяющая снизить время составления частотно-территориального плана сети на 80%;

- разработаны алгоритмические средства поддержки принятия решений для задач, возникающих при проектировании новых или модификации действующих телекоммуникационных сетей различных типов.

Практическая значимость работы.

- разработано технологическое решение, состоящее из комплекса алгоритмических и инструментальных средств (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 50201550514), в результате использования которого возможно достижение полной автоматизации процесса поиска оптимального проектного решения для выбранной зоны расчетов;

– внедрение разработанной информационной системы повышает эффективность планирования радиосетей на 21% в целом и, в частности, эффективность использования ресурсов возрастает на 26%, управление рисками – на 19%, организация времени – на 27.5%;

– разработанная методика оптимального планирования сети радиосвязи, отличающаяся сочетанием методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, позволяет снизить временную сложность применяемых алгоритмов с экспоненциального времени до линейно-логарифмического.

Научные результаты, выносимые на защиту:

– алгоритмические средства поддержки принятия решений, адаптированные для использования в методах эволюционного моделирования и соответствующие рекомендациям Международного Союза Электросвязи, включающие модели распространения радиосигналов и определения зоны прямой видимости, а так же методику расчета зон покрытия.

– методика поиска оптимального решения задачи планирования сети радиосвязи, основанная на применении методик многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, учитывающая противоречивые требования, возникающие в процессе планирования;

– комплекс алгоритмических и инструментальных средств, обеспечивающий планирование и оптимизацию топологии радиосетей, составление частотных планов по выбранной области в полностью автоматическом режиме.

Достоверность полученных научных результатов обусловлена применением адекватного математического аппарата, подтверждается их согласованностью с результатами компьютерного моделирования и сопоставлением ряда полученных результатов с данными, известными из российской и зарубежной литературы.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные теоретические и практические результаты работы реализованы в виде комплекса средств программного обеспечения, предназначенного для автоматизации процесса проектирования радиосетей. Результаты работы получили практическое внедрение в ЦСИР АО «НТЦ РЭБ», а также включены в материалы учебно-методического комплекса преподавания дисциплин «Моделирование процессов и систем» и «Методы и средства проектирования информационных систем и технологий» в ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», что подтверждено соответствующими актами.

Апробация. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: IV Научно–технической конференции молодых ученых и специалистов "Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО" (Москва, 2013), XX Международной научно-технической конференцией «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2014) (Воронеж, 2014г.) IV научно-практической Internet-конференции, "Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики" (Ульяновск, 2014 г.), IV Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в науке и образовании» (Чебоксары, 2015 г.), VII Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем" (Москва, 2016г.), II Международная научно-практическая конференция «Научные исследования: теория, методика и практика» (Чебоксары, 2017г.).

Работа выполнялась при финансовой поддержке Фонда развития малых форм предприятий «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» «У.М.Н.И.К» (тема № 6216ГУ/2015, 2015-2016 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 21 научной работе, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Основная часть работы изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 136 наименований.

1. Системы автоматизированного проектирования радиосетей

1.1. Общие принципы построения радиоэлектронных систем

1.1.1. Классификация радиоэлектронных средств и систем

В настоящее время радиосвязь позволяет реализовать полный спектр информационных услуг: передачу телефонных сообщений, обмен данными, подключение к глобальным информационным сетям, получение и передачу видеоизображений, телевидение и т.д. Радиосвязь дополняет и расширяет возможности проводной связи, дает свободу передвижения, а в некоторых случаях осуществляет обмен информацией. Итак, применение средств радиосвязи реализует единое информационное пространство, позволяющее в любой точке планеты и в любое время получать необходимые услуги.

Роль радиосвязи в обществе и технике постоянно возрастает: создаются высокоэффективные системы управления техническими объектами, производственными, технологическими и другими процессами.

Под системой радиосвязи понимают совокупность технических средств, предназначенных для решения важных народно-хозяйственных, научных, оборонных или специальных задач, связанных с преобразованием информации, в которых радиоэлектронные средства выполняют основные или одну из основных функций. Радиоэлектронные средства – технические средства, предназначенные для передачи и приёма радиоволн, состоящие из одного или нескольких передающих и приёмных устройств либо комбинации таких устройств и включающие в себя вспомогательное оборудование. Классификация систем радиосвязи включает огромное, постоянно увеличивающееся, количество видов, отличающихся назначением и характеристиками, обеспечивающих удовлетворение всех нужд человечества.

Существует несколько классификаций современных РЭС, а именно:

- по природе используемых волновых процессов;
- по характеру решаемых задач;
- по своей иерархии;

- по условиям размещения;
- по характеру взаимодействия;
- по своей элементной базе.

Так, например, по природе используемых волновых процессов среди радиоэлектронных средств выделяют радиотехнические, оптические, акустические и комбинированными. По характеру решаемых задач РЭС могут быть информационными, энергетическими, информационно-энергетическими.

В рамках данной работы наибольший интерес представляют информационные РЭС, которые решают следующие задачи:

- передача информации на расстояние;
- извлечение информации;
- информационное обеспечение систем управления;
- сохранение информационных возможностей в условиях применения мешающих РЭС;
- искажение или разрушение передаваемой и добываемой противником информации;
- защита своей информации.

Наибольшее развитие в настоящее время получили РЭС, решающие проблемы передачи информации с помощью радиоволн на большие расстояния. Это проблемы техники связи, радио- и телевизионного вещания, радиотелеметрии и т.д.

В данном диссертационном исследовании рассмотрены вопросы построения и планирования современных систем радиосвязи на примере частотно-территориального проектирования сотовых мобильных сетей.

1.1.2. Современные системы сотовой связи

Профессиональными системами мобильной или подвижной радиосвязи PMR (Professional Mobile Radio) называются телекоммуникационные системы, использующие в качестве каналов связи радиоканал и предусматривающие

использование нестационарных (носимых) пользовательских терминалов [17, 59]. Как правило, они имеют радиальную или радиальнозональную (сотовую) структуру сети и могут использовать как симплексные (односторонние), так и дуплексные каналы (двухсторонние) каналы связи. При этом предполагается, что сама система может использовать для своих служебных нужд и управления коммутируемые и выделенные проводные линии электросвязи и оборудование стационарных систем телефонной связи общего пользования – PSTN (англ. Public Switched Telephone Network). В связи с большим количеством различных по функциональному составу и назначению систем мобильной связи в международной трактовке для обобщенной классификации используется термин «система связи подвижной службы (ССПС)».

Мобильная связь организуется с помощью систем сотовой радиосвязи (ССС). Современные СССР обеспечивают мобильность абонента практически по всему земному шару. Применение сотового принципа построения сети, принципа массового обслуживания и эволюции электронных компонентов позволило к 80-м годам XX века преодолеть главные технические трудности, стоявшие на пути общедоступного применения систем сотовой связи. Эти нововведения позволили создать достаточно эффективные в технико-экономическом плане СССР, обеспечивающие массовую доступность абонентов, благодаря относительно низким тарифам за услуги мобильной связи.

Основными структурными элементами современной СССР являются следующие (рис. 1): территория обслуживания (ТО), базовые станции (БС), соты, центральная станция (ЦС) – центр коммутации и обслуживания, соединительные линии (СЛ), мобильные абонентские станции (АС или МС) [82, 9, 38].

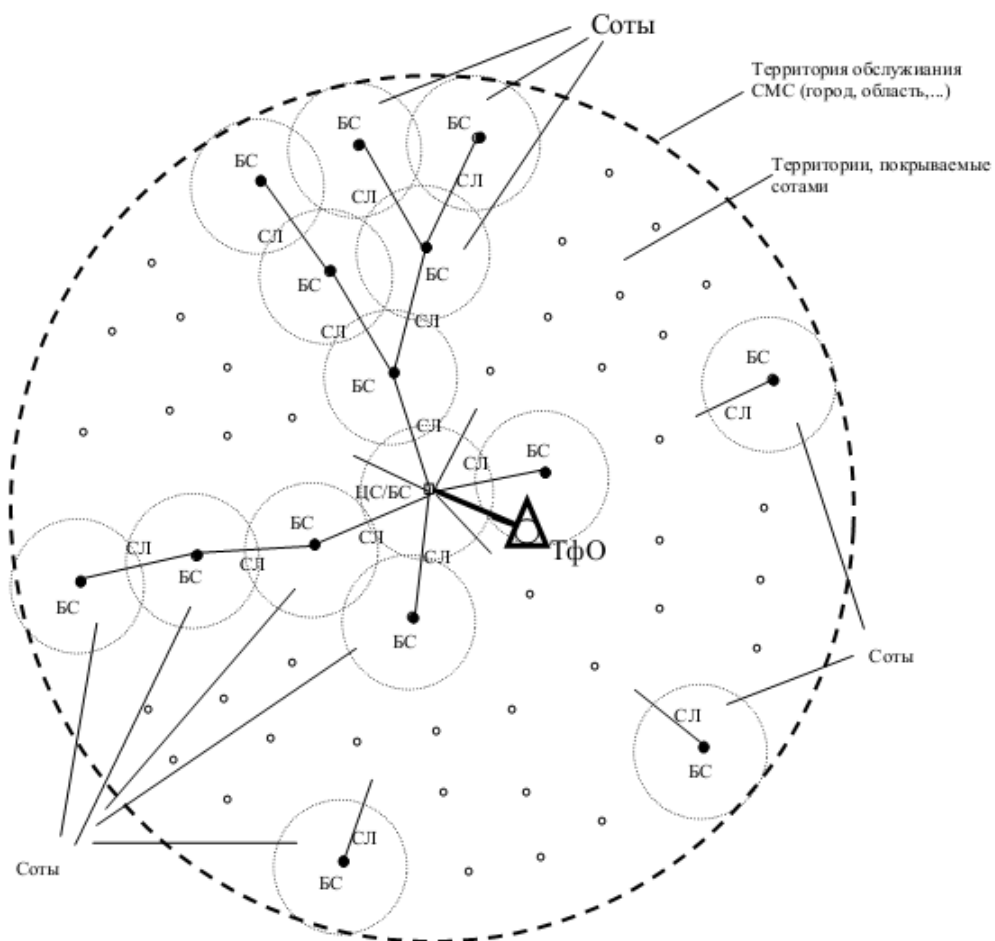


Рисунок 1 – Общая структура сотовой системы радиосвязи

Радиопокрытие БС формирует локальные зоны обслуживания – соты, из которых складывается покрытие всей территории. БС всех сот имеют приемопередающие антенны с круговой диаграммой направленности и соединяются с помощью соединительных линий с ЦС, который через телефонную сеть общего пользования (ТфОП) подключается к другим сотовым сетям. Основной функцией ЦС является маршрутизация и контроль всего объема входящих и исходящих сообщений абонентов (трафика).

Свободное перемещение абонента между сотами обеспечивается благодаря процедуре хэндовера (ведения абонента, эстафетной передачи абонента). Данной процедурой так же управляет ЦС. При перемещении АС на территорию обслуживания другой сотовой сети задействуется процедура роуминга – временная передача абонента под контроль гостевой сети. В этой сети абонент

автоматически регистрируется в специальной БД – гостевом регистре местоположения. Домашняя сеть уведомляется о роуминге абонента.

ЦС производит непрерывный контроль соединений абонента и начисление платы за услуги связи с помощью биллинговой системы – автоматической системы тарификации. Различные режимы работы этой системы определяют определенные режимы тарификации (тарифные планы) для каждого абонента сотовой сети.

1.1.3. Проектирование сетей сотовой связи

1.1.3.1. Развитие подходов к планированию сетей радиосвязи

Стремительное развитие сетей мобильной радиосвязи наблюдается во всем мире. Активно развиваются сотовые, транкинговые, пейджинговые сети, а также сети абонентского радиодоступа. Активный рост числа радиосредств делает актуальной задачу эффективного использования радиочастотного спектра (РЧС) и, как следствие, задачу построения систем, позволяющих оптимально планировать сети радиосвязи.

В процессе проектирования сети сотовой связи составляется частотно-территориальный план, наиболее полно охватывающий зону, в которой планируется работа ССС, определяющий места установки базовых станций и распределяющий выделенные частотные каналы между сотами. От эффективности данного процесса зависит качество обслуживания абонентов, надежность и стоимость будущей сети связи. Для уменьшения капитальных затрат должна осуществляться оптимизация частотно-территориального плана, т. е. необходимо разрабатывать план, обеспечивающий заданную зону обслуживания, емкость сети, требуемое качество обслуживания при минимальном числе базовых станций и используемых частот.

Радиосети характеризуются следующей совокупностью существенных признаков. Это наиболее динамично развивающаяся область науки и техники, следствием чего является быстрое увеличение объема информации и малое время жизни производимых моделей; многообразие систем и устройств различного

функционального назначения; совместное использование широкополосных и узкополосных сигналов; широкий диапазон применяемых в радиосетях рабочих частот; многообразие методов и устройств формирования, передачи, распределения, приема и обработки сигналов; многообразие приемов схемотехнической реализации используемых в радиосетях преобразований сигналов; широкое использование последних достижений информатики, радио- и микроэлектроники, включая использование микропроцессоров и цифровой обработки сигналов; сложность и большое число преобразований сигналов и, как следствие, ориентация на применение больших и сверхбольших интегральных схем; высокие требования к параметрам качества систем и устройств телекоммуникаций [73].

В 1993 году Пол Хартман ввел в использование план повторного использования частот для сотовых радиосетей. Он выделил 12 групп частот для группы из 4 базовых станций. Эти же частоты повторно использовались другими группами БС. Каждая БС обслуживает 3 шестиугольных соты, используя 3 группы антенн, разнесенных на 120 градусов друг от друга (рис. 2) [105].

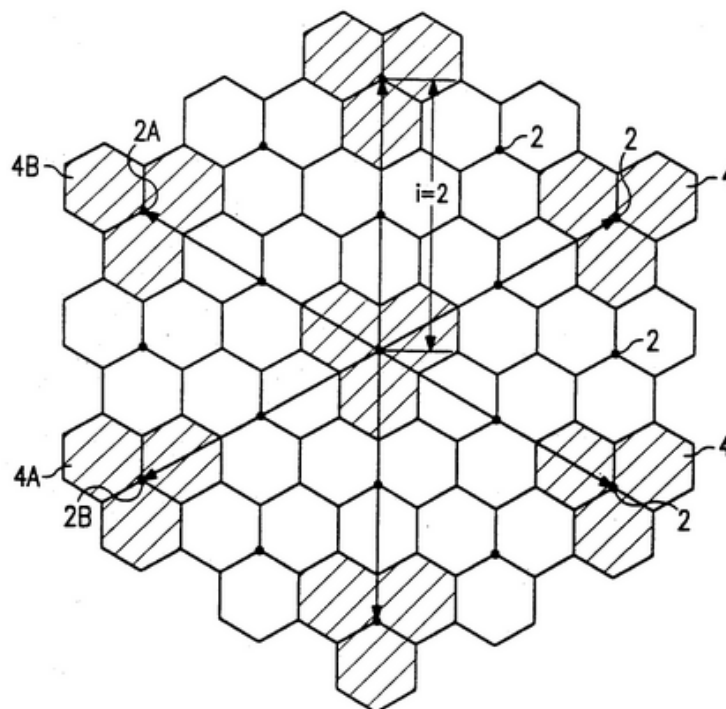


Рисунок 2 – Обслуживание сот БС

В 1994 году Р. Мэйден предложил методику и механизм динамического распределения загрузки коммуникационного канала в секторных сотовых сетях [113]. В таких сетях БС имеют разделенные на сектора антенны, каждый сектор которой характеризуется шириной и длиной луча. Загрузка канала регулируется за счет сужения луча первого сектора перегруженной соты и соответствующего расширения луча второго сектора ближайшей БС, а также передачи ей затронутых абонентов. Также существует альтернативный метод, используемый в сетях с всенаправленными антеннами. В нем загрузка канала распределяется за счет уменьшения мощности ближайшей к перегруженной соте антенны, если перегрузка возникла из-за интерференции. Затем абоненты перегруженной соты передаются на обслуживание более подходящей БС.

Существует подход к построению сотовых сетей с частотным планом и уменьшенной межканальной интерференцией, предложенный П. Ра [126]. Сотовая радиосеть включает в себя набор граничащих друг с другом сот на заданной территории, в каждую соту входит определенное количество секторов, сгруппированных в кластеры. Каждому кластеру присваивается набор системных частот таким образом, что каждая сота в кластере обладает подмножеством частот, таким что существует N групп совмещенных по частоте сот, включающих по одной соте из каждого кластера. Каждому сектору присваивается частота из соответствующего подмножества. Таким образом снижается уровень интерференции и повышается качество обслуживания и емкость сети.

В 1995 году Д. Смит предложил набор оборудования, необходимый для обеспечения функционирования соты [131]. Такой набор включает передатчик, выступающий в качестве первого источника сигнала, так же 2 сумматора сигнала, настроенных на первую и вторую частоты. Далее присутствует устройство для переключения частот, связанное с передатчиком и сумматорами. В некоторых реализациях, в каждый сумматор может входить резонатор для отделения одних источников сигнала от других.

В 1997 году Д. Донер представил улучшенный план переиспользования частот в беспроводных телекоммуникационных системах [98]. Его идея

заключается в разделении всех доступных частот на 6 групп и использовании БС с шестью направленными антеннами (по 60 градусов). Каждой соте назначается две группы частот, которые распределяются между секторами так, чтобы у двух смежных секторов не оказалось одинаковой частоты. При распределении частот для МС, находящейся во внешней части сектора, предполагается избегать назначения частоты, которая уже используется в смежной соте. Это гарантирует минимальный уровень интерференции даже без использования специальных технологий кодирования.

Существует множество методов покрытия территории сигналом с учетом доступной ширины канала и распределения частот. Один из таких методов был предложен Л. Фишером в 2000 году [100]. Все соты разбиваются на кластеры (минимум 2), хотя бы в одном кластере должны использоваться антенны с поворотными устройствами, частота канала связывается с углом поворота антенны.

Лэун Кин в 2001 году усовершенствовал методы построения сотовых сетей с высокой емкостью путем увеличения количества секторов и чередующимся назначением каналов. Он предложил использовать узконаправленные соты с четырьмя лучами (4 антенны по 60 градусов на каждой БС, разнесенные на 90 градусов), что позволило оптимизировать область покрытия, снизить интерференцию и получить коэффициент переиспользования равный 2 [110].

В 2004 году М. Гилбертом была разработана методика динамического распределения ресурсов в сетях передачи данных [104]. В предложенной им схеме, контроллер ресурсов выделяет часть возможностей системы для расчета пути приема и передачи данных. Схемы передачи и объемы данных в сети контролируются сетевым процессором. Выделенные ресурсы после расчета путей возвращаются в общий пул. Для повышения эффективности использования возможностей сети используется система искусственного интеллекта, которая предсказывает будущие ее потребности.

В настоящее время среди множества разнообразных методов частотно-территориального планирования сетей радиосвязи можно выделить следующие основные и широко используемые методы:

- метод, основанный на теории однородных сетей передатчиков [31, 83];
- метод, основанный на теории графов [83, 89];
- компьютерные методы [89, 39, 40, 26];

Сеть базовых станций, полученная в результате использования метода однородных сетей, представляет собой геометрически правильную сетку на поверхности Земли. Однако реальные сети передатчиков не обладают одинаковой геометрически правильной формой и их технические характеристики отличаются от теоретических. Эти отклонения снижают эффективность планирования методом однородных сетей. Практическую ценность при применении данного метода представляют результаты планирования использования радиочастотного спектра при назначении частотных каналов передатчикам системы связи.

Чаще всего при частотно-территориальном планировании ССС используется метод, основанный на теории графов. В этом случае множество передающих станций радиосети представляется в виде множества вершин графа. Станции, которые могут создавать в зонах обслуживания недопустимые помехи, соединяются ребрами. Множество выделенных частотных каналов представляется в виде совокупности цветов. В данном методе задача планирования радиосети сводится к обобщенной задаче раскраски графа, ограниченной некоторыми дисковыми (реберно-ограниченными) графами. Некоторые подзадачи в задаче раскраски графов имеют решения с полиномиальным временем, однако известные решения задачи частотно-территориального планирования ограничиваются лишь частными вариантами, которые пригодны для применения на практике [52].

Планирование сетей сотовой связи невозможно без применения компьютерных технологий и специальных программных комплексов [40, 53]. Это обусловлено необходимостью обработки и визуализации больших объемов пространственной информации в процессе проектирования. Использование

геоинформационных систем (ГИС) позволяет обеспечить сбор, хранение, обработку, доступ и отображение пространственно-координированных данных и электронных карт местности. Современные подходы к построению программных средств позволяют создать систему проектирования, организованную в виде отдельных компонентов, центральным из которых является ядро ГИС и взаимодействующих через абстрактные стандартизированные интерфейсы. Применяемые при планировании программные продукты и их методы представляют особую важность и будут рассмотрены в следующих разделах.

Помимо рассмотренных методов частотно-территориального планирования, важную роль при проектировании сети радиосвязи имеют методы планирования зон обслуживания. Выделяют два основных способа деления территории обслуживания на зоны [23, 57]:

- статистический метод, в котором используются статистические параметры распространения сигналов;
- детерминированный метод, в котором параметры сигнала измеряются или рассчитываются для каждого конкретного района.

При использовании статистического метода вся территория обслуживания разбивается на одинаковые по форме зоны. Размеры этих зон, расстояния между ними и влияния друг на друга определяются с помощью статистических законов распространения радиоволн.

Детерминированный метод более предпочтителен и оптимален, так как при его использовании предполагается тщательное измерение или расчет характеристик системы. В данном случае учитывается рельеф местности для оптимального расположения БС и возможность применения направленных антенн. Недостатком данного метода является его сложность и необходимость применения специальных программных комплексов и ресурсоемкого моделирования [23, 10].

1.1.3.2. Радиоконтроль за излучениями радиоэлектронных средств

Радиоконтроль является составной частью государственного управления использованием радиочастотного спектра и международно-правовой защиты присвоения (назначения) радиочастот или радиочастотных каналов.

Система радиоконтроля, как элемент системы управления использованием радиочастотным спектром (РЧС), обеспечивает оценку, измерение и контроль параметров излучений РЭС сетей и систем радиосвязи, отдельных РЭС и высокочастотных устройств (ВЧУ), источников индустриальных излучений, поиск источников помех и незаконно работающих РЭС и ВЧУ.

К объектам радиоконтроля относятся [27]:

- сети и системы радиосвязи, функционирующие на основании Разрешений на использование радиочастот или радиочастотных каналов в полосах частот, выделенных Решениями ГКРЧ;
- полосы частот, определенные действующими Решениями ГКРЧ с установленными условиями использования;
- объекты, объединяемые в однородные группы с единым административным управлением, с условиями применения, определяемыми Решениями ГКРЧ;
- отдельные РЭС и ВЧУ;
- источники индустриальных радиопомех (ИРП), с условиями применения, определяемыми Нормами на индустриальные радиопомехи.

Предметом радиоконтроля являются электромагнитные излучения объектов радиоконтроля.

Документы Международного Союза Электросвязи включают рекомендации по структуре и функциям системы радиоконтроля национального уровня и определяют минимальный уровень требований к современным СРК [125, 123].

Цель национальных систем радиоконтроля состоит в получении достоверных данных о состоянии использования спектра в масштабе времени, близком к реальному, путем измерения характеристик излучений РЭС объектов

контроля, необходимых и достаточных для обеспечения управления использованием радиочастотного спектра, включая соблюдение условий электромагнитной совместимости (ЭМС).

Параметры, подлежащие радиоконтролю: частота, ширина полосы частот, уровень сигнала, напряженность поля и плотность потока мощности, параметры модуляции, параметры нежелательных излучений, координаты мест установки источников излучения и высот их подвеса, занятость спектра, параметры зоны покрытия, параметры качества предоставляемых услуг.

Во многих странах используют геоинформационные системы с отображением состояния электромагнитной обстановки для расширения функциональных возможностей системы радиоконтроля (СРК).

При планировании работы СРК применяется гибкий подход, предусматривающий больший охват территорий с высокой плотностью населения и меньший - территорий с низкой плотностью населения (сельская местность).

Развитие систем радиоконтроля различных государств идет по пути поиска способов повышения эффективности за счет иерархического построения СРК, гибкого планирования мероприятий контроля, уменьшения количества фиксированных обслуживаемых станций радиоконтроля и замене их необслуживаемыми и подвижными станциями, применения ГИС и их использования при планировании мероприятий радиомониторинга, применения аутсорсинга, партнерских отношений с владельцами сетей радиосвязи или инфраструктуры и пр.

В Российской Федерации создана и применяется автоматизированная система радиоконтроля (АСРК), которая обеспечивает полноту охвата РЭС до 100 % с периодичностью контроля раз в три года (около 34 % в год) [27]. Наличие АСРК позволяет получать общую картину состояния использования спектра, обнаруживать и устранять нарушения условий использования спектра и пресекать незаконное использование РЧС.

Система радиоконтроля Российской Федерации включает в себя три подсистемы: подсистему контроля излучений РЭС в диапазоне до 30 МГц,

подсистему контроля излучений РЭС в диапазоне свыше 30 МГц, подсистему контроля излучений РЭС спутниковых служб радиосвязи.

1.1.3.3. Задача синтеза оптимальной архитектуры сети

Одним из наиболее сложных и важных этапов развертывания ССС является проектирование, так как на этом этапе должно быть обеспечено максимально близкое к оптимальному по критерию эффективность-стоимость построение сети [101, 22]. В течение данного этапа определяются места установки БС и распределяются частотные каналы между сотами (с учетом принципа повторного использования частот) для обеспечения связью заданной территории с требуемым качеством и минимальной стоимости инфраструктуры (минимальном числе БС). Такая задача очень сложна, так как, с одной стороны, слишком частая расстановка БС экономически невыгодна, с другой стороны, при редком расположении БС могут появиться необслуживаемые участки территории. Дополнительно задача усложняется трудностью аналитической оценки характеристик сигналов (распространение сигналов, расчет напряженности), а также неравномерностью трафика в границах обслуживаемой территории.

В ходе разработки проекта необходимо выполнять большой объем расчетов, требующих интенсивного использования вычислительных средств, так как архитектура и параметры сети существенно зависят от условий местности (рельефа, характеристик застройки и т.п.) [70]. Таким образом, проектирование начинается с создания электронной карты территории – переноса в компьютер топографической карты местности со всеми параметрами и характеристиками, существенными для составления проекта. Затем разрабатывается предварительный план расположения БС и сот сети с учетом характеристик намечаемой к использованию аппаратуры и результатов приближенной оценки энергетического баланса. Далее с помощью выбранных моделей распространения радиоволн и характеристик местности для полученной схемы уточняются параметры электромагнитного поля в пределах зоны обслуживания, что позволяет оценить качество покрытия. Для той же схемы составляется частотно-

территориальный план (распределение частот по сотам в соответствии с принципом повторного использования частот), а также оцениваются трафик и емкость для характерных участков и сети в целом. Процесс проектирования является итерационным, и, если по показателям качества покрытия, трафика или емкости составленный план сети не удовлетворяет предъявляемых к нему требований, производится его корректировка, и для нового плана производятся заново все перечисленные расчеты.

Также в процессе проектирования сети обязательно проводятся экспериментальные измерения характеристик электромагнитного поля, по результатам которых схема сети корректируется. Необходимость проведения экспериментальных измерений, а также их объем и частота повторений определяется исходя из опыта проектировщиков сотовой сети. Окончательная оценка качества проекта производится уже на этапе введения сети в эксплуатацию, на котором также неизбежна его корректировка и доработка, особенно в самом начале работ, когда производятся настройка и оптимизация сети. Фактически, этот этап работы оказывается одним из самых трудоемких. Для повышения качества сети, проект дорабатывается по мере ее развития и совершенствования.

Характеристики базовых станций определяют общее качество услуг, предоставляемых сетью связи. При планировании сети БС решаются следующие задачи: обеспечения радиопокрытия зоны предоставления услуг связи; построение сети, обеспечивающей необходимую емкость для обслуживания создаваемого абонентами трафика с допустимым уровнем перегрузок; оптимизация решения указанных выше задач (с использованием минимального числа сетевых подсистем и элементов) на протяжении всего жизненного цикла сети.

Без решения перечисленных задач невозможно гарантировать предоставление услуг высокого качества. Согласно определению Международного союза электросвязи (МСЭ), под качеством обслуживания понимают совокупный эффект от предоставления услуг, который определяет

степень удовлетворения ими абонента. Кроме технических аспектов качества работы сети в это определение включены и аспекты, связанные с предоставлением дополнительных услуг (например, таких, как передача коротких сообщений), стоимостью обслуживания, ценой и качеством работы мобильных терминалов и т.д. [124].

На протяжении всего жизненного цикла сети число ее абонентов, объем трафика и его распределение по обслуживаемой территории постоянно изменяются. Кроме того, существуют сезонные (периодические) изменения объема трафика и его территориального распределения. Архитектура сети БС должна адаптироваться к происходящим изменениям, поэтому ее планирование – это непрерывный процесс. В нем можно выделить несколько этапов [56]:

- планирования радиопокрытия;
- планирование емкости;
- частотное планирование;
- анализ работы и оптимизация сети.

Все этапы проектирования взаимосвязаны между собой, поэтому такое поэтапное деление в значительной степени условно. Последовательность этапов планирования сети БС показана на рисунке 3.

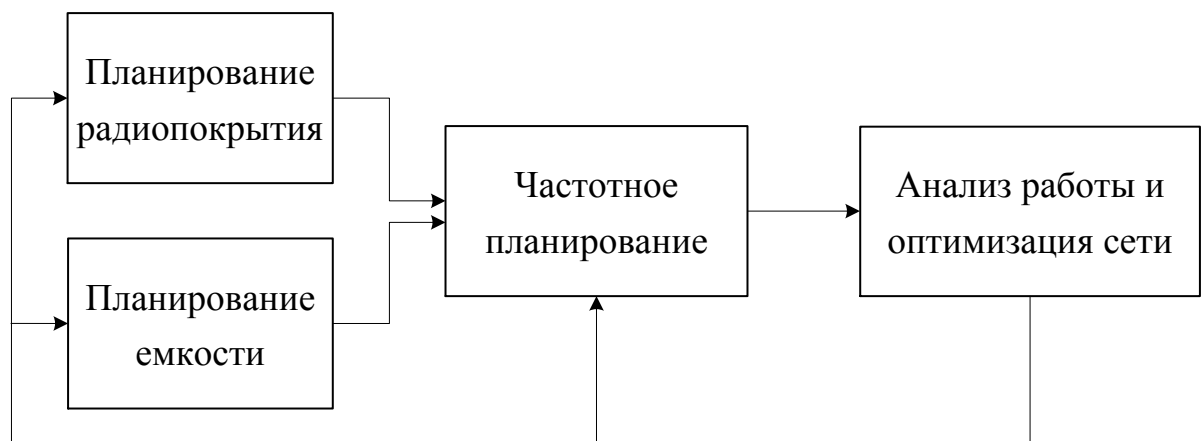


Рисунок 3 – Этапы планирования сети БС

Процесс планирования сотовой сети связи можно разделить на следующие логические этапы [115]:

- Получение исходных данных.
- Калибровка математической модели распространения радиоволн на основе измерений напряженности поля в наиболее характерных точках зоны обслуживания сети.
- Построение первого приближения радиосети.
- Привязка участков развертывания базовых станций, определенных планом построения сети, к местности и итеративная оптимизация при широком использовании средств программного обеспечения, поддерживающего функции синтеза сети и анализа эксплуатационных характеристик.

Для проведения планирования, необходимо предоставить следующие исходные данные, отражающие общие характеристики сети связи: число и частоты разрешенных радиоканалов; план сети с указанием желательных пунктов размещения БС, отвечающих требованиям по наличию линий связи с АТС общего пользования, электропитанию, возможности размещения оборудования и установки антенн и др.

Очевидно, что на результаты планирования существенное влияние оказывают системные факторы, усиливая сложность и неоднозначность решения задачи синтеза сети радиосвязи.

1.2. Программные комплексы планирования радиосетей

В связи с многообразием и сложностью задач моделирования и проектирования беспроводных сетей трудно рассчитывать на реализацию в одной универсальной модели полного набора функций, необходимых для решения всех поставленных 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 [58, 28, 61, 8, 118]. Среди них следует выделить 4 ключевых типа:

1. Системы частотно-территориального планирования беспроводных сетей; применяются на этапе развертывания новых или модернизации существующих беспроводных сетей различного назначения для оптимального выбора мест и состава оборудования приемопередающих станций; их особенностями являются:

- использование электронных географических карт для точной привязки модели сети к местности;
- применение строгих моделей распространения электромагнитных волн в каналах связи;
- широкий спектр рассчитываемых характеристик;

Системы, обеспечивающие решение задач электромагнитной совместимости беспроводных сетей; применяются, как и первые, на этапе развертывания новых или модернизации существующих беспроводных сетей различного назначения для согласования их параметров с параметрами других сетей с целью минимизации взаимных помех. Для них характерно:

- возможность подключения к базам данных с местами размещения и составом приемопередающей аппаратуры всех радиосредств, работающих в рассматриваемом регионе;
- возможность подключения к базам данных параметров приемопередающей аппаратуры различных производителей;
- использование электронных географических карт для точной привязки модели сети к местности;
- применение строгих моделей распространения электромагнитных волн в каналах связи;
- расчет характеристик помех различного вида и оценка их влияния на параметры сетей;

Системы мониторинга качества работы существующих сетей; применяются для измерения и последующего анализа характеристик сети в реальных условиях ее функционирования; в системах такого типа обеспечивается:

- обмен информацией с базами данных измерений параметров реальных сетей;
- возможность сравнения результатов расчета и эксперимента и корректировки параметров модели сети по его результатам;

Системы, предназначенные для оптимизации принципов передачи информации и параметров оборудования разрабатываемых сетей; в таких системах:

- нет необходимости в точной привязке модели сети к определенной местности;
- должна быть обеспечена возможность проверки работоспособности системы в различных условиях, вследствие чего применяются статистические модели распространения электромагнитных сигналов;
- имеется возможность задания различных алгоритмов работы сети.

Примеры компьютерных систем каждого типа приведены в таблицах 1-5.

Таблица 1 – Программы планирования беспроводных сетей на основе электронных карт местности

№	Фирма-разработчик	Программа	Модуль
1	AWE Communications GmbH	WinProp	ProMan
2	ATDI	ICS Telecom	
3	ATDI	HTZ Warfare	
4	ATDI	HerTZ Mapper	
5	MapInfo	deciBel Planner	
6	FORSK	Atoll	
7	EDX Engineering Inc.	EDX SignalPro	Cellular/PCS
8	EDX Engineering Inc.	EDX SignalPro	Fixed Broadband
9	EDX Engineering Inc.	EDX SignalPro	3G UMTS
10	EDX Engineering Inc.	EDX SignalPro	Microcell/Indoor
11	LS tel com	CHIRplus M	
12	LS tel com	MULTilink	

Продолжение таблицы 1

13	LS tel com	CHIRplus BC	
14	MSI	Planet DMS2.2	
15	CDS	RFcad	
16	MPRG RF Lab	SitePlanner	
17	MPRG RF Lab	SIRCIM	
18	ООО «ИнфоТел»	ONEPLAN RPLS	
19	MLJ	PathPro	
20	Ericsson	EET	
21	МИЭТ, каф. «РЭ», ЦКТ «СТС»	RPS-2	
22	SoftWright LLC	TAP	
23	ЛОНИИР	БАЛТИКА	Балтика СПС
24	ЛОНИИР	БАЛТИКА	Балтика РРЛ
25	Radio Engineering Services	HERALD	

Таблица 2 – Программы планирования беспроводных сетей внутри зданий

№	Фирма-разработчик	Программа	Модуль
1.	AWE Communications GmbH	WinProp	ProMan
2	EDX Engineering Inc.	EDX SignalPro	Microcell/Indoor
7	MSI	Planet DMS2.2	
3	MPRG RF Lab	SMT Plus	
4	MPRG RF Lab	SIRCIM	
5	МИЭТ, каф. «РЭ», ЦКТ «СТС»	RPS-2	

Таблица 3 – Программы управления БД и решения задач ЭМС

№	Фирма-разработчик	Программа	Модуль
1	AWE Communications GmbH	WinProp	WallMan
2	ATDI	Iris	
3	LS tel com	SPECTRAplus	
4	LS telcom	SPECTRA DB	
5	MLJ	PathGuard	
6	МИЭТ, каф. «РЭ», ЦКТ «СТС»	RPS-2	
7	ЛОНИИР	БАЛТИКА	Балтика ЭМС
8	Фирма «ЯР», г. Ярославль	ПИАР	

Таблица 4 – Программы мониторинга характеристик работающих сетей

№	Фирма-разработчик	Программа	Модуль
1	ATDI	RACSS	
2	ATDI	Validata	
3	LS telcom	MONITORplus	
4	Agilent	Agilent E74xx	
5	Rohde& Schwarz	Roseval	
6	MLJ	Path View	
7	MLJ	PathSearch	
8	Ericsson	TEMS	
9	МИЭТ, каф. «РЭ», ЦКТ «СТС»	RPS-2	

Таблица 5 – Программы оптимизации принципов передачи информации

№	Фирма-разработчик	Программа	Модуль
1	Agilent	Agilent ADS	
2	MPRG RF Lab	BERSIM	
3	Agilent Technologies	Agilent ADS,	
4	MathWorks	MATLAB	

На сегодняшний день наибольшее распространение на российском рынке получили следующие системы [45]:

- Балтика СПС;
- ONEPLAN RPLS;
- Atoll;

Балтика СПС решает следующие задачи [48]:

– разработка частотно-территориальных планов (ЧТП) вновь вводимых сетей радиосвязи;

– разработка частотно-территориальных планов развития действующих сетей с целью расширения зоны охвата и/или увеличения абонентской емкости сети;

– анализ электромагнитной обстановки с целью минимизации внутрисетевых и междсетевых помех и повышения качества обслуживания абонентов.

Балтика СПС позволяет прогнозировать радиопокрытие, создаваемое как отдельной базовой станцией, так и всей системой связи в целом, определять зоны взаимных помех радиосредств, оптимизировать трафик, проводить частотное планирование.

Частотно-территориальный план оптимизируется с целью минимизации числа используемых частотных каналов при обеспечении внутрисетевой электромагнитной совместимости и заданного трафика.

Расчеты радиопокрытия сети связи позволяют получить исчерпывающие данные о взаимных помехах БС (матрицу ЭМС), которые используются для построения (оптимизации) частотного плана сети. Программа поддерживает алгоритмы автоматического формирования частотного плана.

Пользовательский интерфейс системы показан на рис. 4.

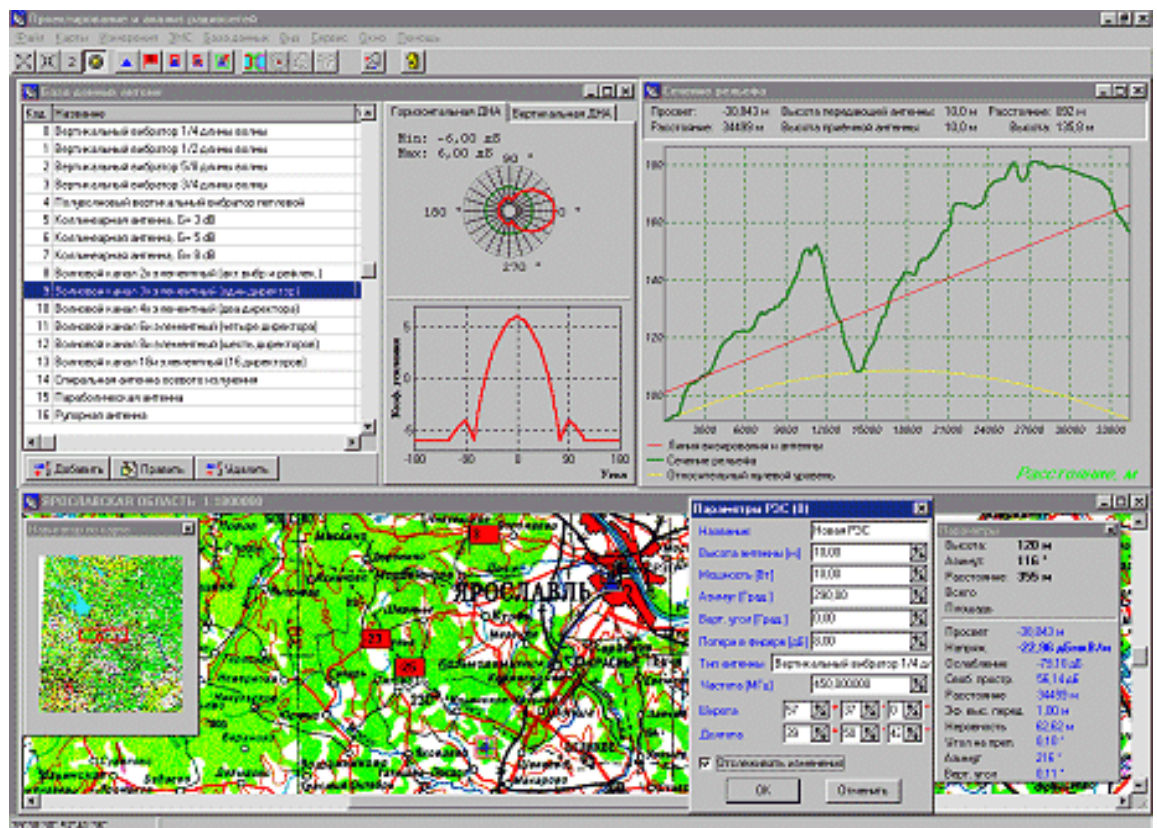


Рисунок 4 – Интерфейс системы Балтика СПС

Программные комплексы ONEPLAN RPLS предназначены для разработки технически и экономически обоснованных планов развития, совершенствования и модернизации сетей подвижной и фиксированной радиосвязи различных стандартов, включая радиорелейную связь, на основе оптимизации технических и структурно-топологических характеристик сети [47].

Комплекс ONEPLAN RPLS построен на геоинформационных технологиях и позволяет автоматизировать разработку технически и экономически обоснованных планов развития, модернизации и оптимизации:

Сетей подвижной связи различных стандартов, включая сети сотовой связи 2-4 поколения (2G/3G/4G), аналоговые и цифровые транкинговые сети, ведомственные сети;

- Систем широкополосного радиодоступа;
- Аналогового и цифрового ТВ и радиовещания;
- Радиорелейных интервалов и линий;
- Транспортной сети.

Функциональные возможности ONEPLAN RPLS позволяют [85]:

а) Решать весь спектр задач по планированию и оптимизации радиоподсистемы:

1) С высокой точностью (средняя ошибка менее 1 дБ, СКО 4-6 дБ) рассчитывать покрытие сетей подвижной связи, систем широкополосного радиодоступа и цифрового ТВ вещания;

2) Формирование и использование комбинированных цифровых моделей местности с векторными данными о местных предметах и SRTM данными о рельефе;

3) Используя эффективные алгоритмы формировать в автоматизированном режиме частотно - территориальный план, распределять BSIC и кодовые последовательности

4) Планировать HF, GPRS, EGPRS, EVDO, HSDPA, OFDM, MIMO и LTE

5) Оценивать на этапе планирования качество предоставляемых услуг – речь, передача данных, видео;

6) Экспортировать результаты расчета и формировать отчеты, импортировать результаты драйв тестов и статистические данные контроллеров для их анализа, планировать внутрисетевой и межсетевой хэндовер;

7) Организовать распределенный и многопроцессорный расчет при больших объемах вычислений, а также формировать задания на автоматическое выполнение расчетов и генерацию карт покрытия по расписанию;

б) Решать весь спектр задач по планированию и оптимизации транспортной сети:

1) Планировать транспортные сети, построенные на радиорелейных средствах.

2) Выполнять расчет интервалов и линий радиорелейной связи, в том числе по ГОСТ Р 53363-2009;

3) Оптимизировать высоты подвеса антенн радиорелейных станций, величины пространственного и частотного разносов, выполнять расчет интервала с пассивным ретранслятором, а также рассчитывать и строить графические зависимости показателей качества радиорелейных интервалов от выбранных пользователем управляемых параметров;

4) Рассчитывать ЧТП и ЭМС группировки радиорелейных средств;

5) Вести учет, осуществлять планирование и оптимизацию маршрутов передачи потоков на транспортных сетях.

Система построена по модульному принципу, что позволяет сформировать архитектуру, максимально приближенную к решаемым задачам планирования сетей подвижной связи. Использование для хранения проектов MS SQL сервера позволяет организовать сетевую работу многих пользователей с единой базой данных (БД). Разграничения прав доступа пользователей к проектам может быть адаптировано к принятому в компании разграничению функциональных обязанностей специалистов по планированию сетей связи. Имеется возможность вводить в базу данных пользовательские поля с отображением их на интерфейсе

программы. Справочник программного комплекса систематизирован и содержит обширную информацию по оборудованию, антеннам, элементам антенно-фидерного тракта, климатическим параметрам регионов. Русскоязычный интерфейс интуитивно понятен и легок в освоении. В ПО ONEPLAN RPLS используются карты в формате MapInfo, имеются все необходимые средства для построения расчетных матриц требуемого разрешения. Предусмотрена возможность подключения SRTM матриц высот рельефа, которые можно свободно скопировать с сайта NASA. ONEPLAN RPLS функционирует под управлением оболочки операционной системы Windows 2k, XP, Vista, Windows 7. База данных строится на MS SQL сервере.

Пользовательский интерфейс системы показан на рис. 5.

FORSK Atoll – это гибкая и масштабируемая платформа для планирования сетей сотовой связи [46].

Atoll позволяет осуществлять планирование сетей связи, построенных на базе следующих технологий:

- GSM/TDMA/GPRS/EDGE
- UMTS/HSDPA/HSUPA

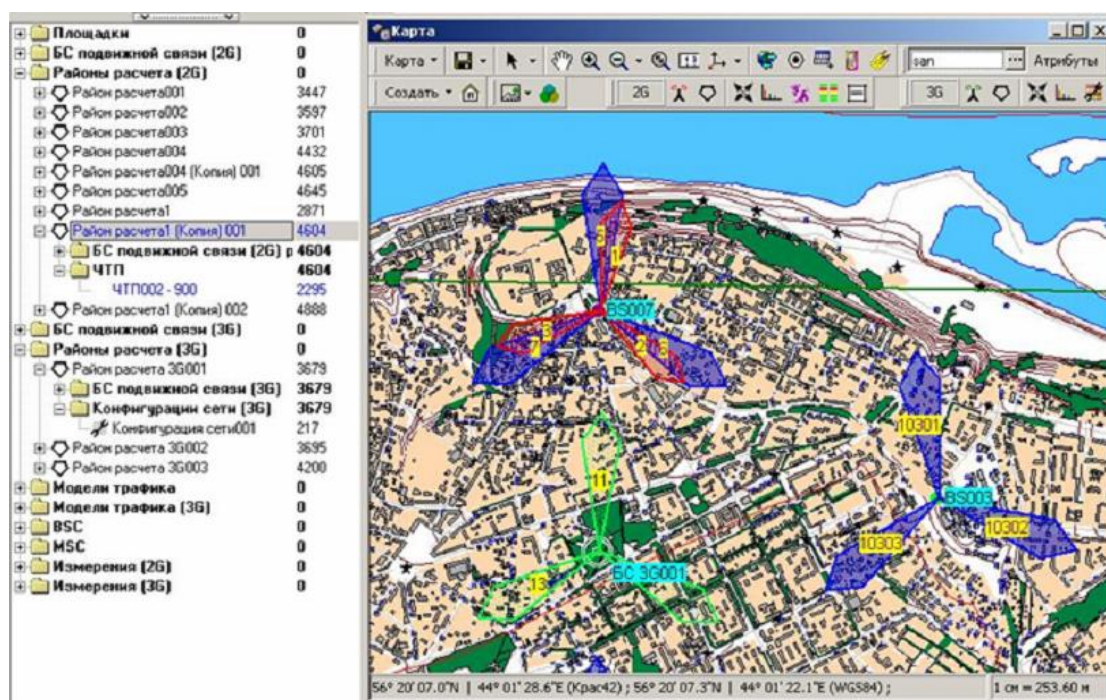


Рисунок 5 – Интерфейс системы ONEPLAN RPLS

- CDMA2000/1xRTT/EV-DO
- WiMAX/BWA

Atoll является открытой платформой и может быть легко интегрирован с другими системами и базами данными, уже работающими на предприятии. Это позволит исключить конфликты данных в процессе интеграции и увеличить производительность работы.

API Atoll позволяет создавать дополнительные плагины для облегчения рутинных операций и разрабатывать свои собственные модели распространения.

Atoll содержит современный набор функций для планирования сетей GSM/GPRS/EDGE, обеспечивающих возможность точного моделирования услуг по передаче голоса и данных, включая поддержку HCS (Hierarchical Cell Structure) и частотного хоппинга (FH) различных типов. Возможность проведения расчетов предикций с различным разрешением для одного и того же проекта, а также интерференции упрощают процесс планирования и оптимизации развитых сетей с большим числом сайтов и покрытием по всей стране.

Atoll обладает также набором функциональных возможностей для совместного планирования сетей 2G/3G, разработанных при участии операторов беспроводной связи :

- Моделирование сети
- Планирование GPRS и E-GPRS
- Планирование и анализ услуг
- Анализ покрытия отдельных сот и сети в целом
- Анализ интерференции
- Анализ трафика
- Создание карт трафика на основе различных видов информации
- Создание матрицы интерференции
- Автоматическое частотное планирование (дополнительный модуль)

- Интеграция с другими программами для частотного планирования с помощью открытого программного интерфейса
- Планирование оборудования для GPRS/E-GPRS
- Расчет GPRS/E-GPRS трафика
- Совместное планирование сетей 2G и 3G

Пользовательский интерфейс системы показан на рис. 6.

Из сравнительного анализа программных комплексов можно сделать вывод, что они обладают примерно одинаковыми функциональными возможностями и сопоставимой достигаемой точностью вычислений. Также необходимо отметить, что проектирование сети выполняется чаще всего для уже составленного предварительного проекта сети, полученного на этапе номинального планирования.

Как правило, на интернет-сайтах разработчиков программных средств планирования ССС отсутствует описание используемых методик планирования, а так же модулей, участвующих в частотно-территориальном планировании сети, не отражены вопросы эффективности планирования.

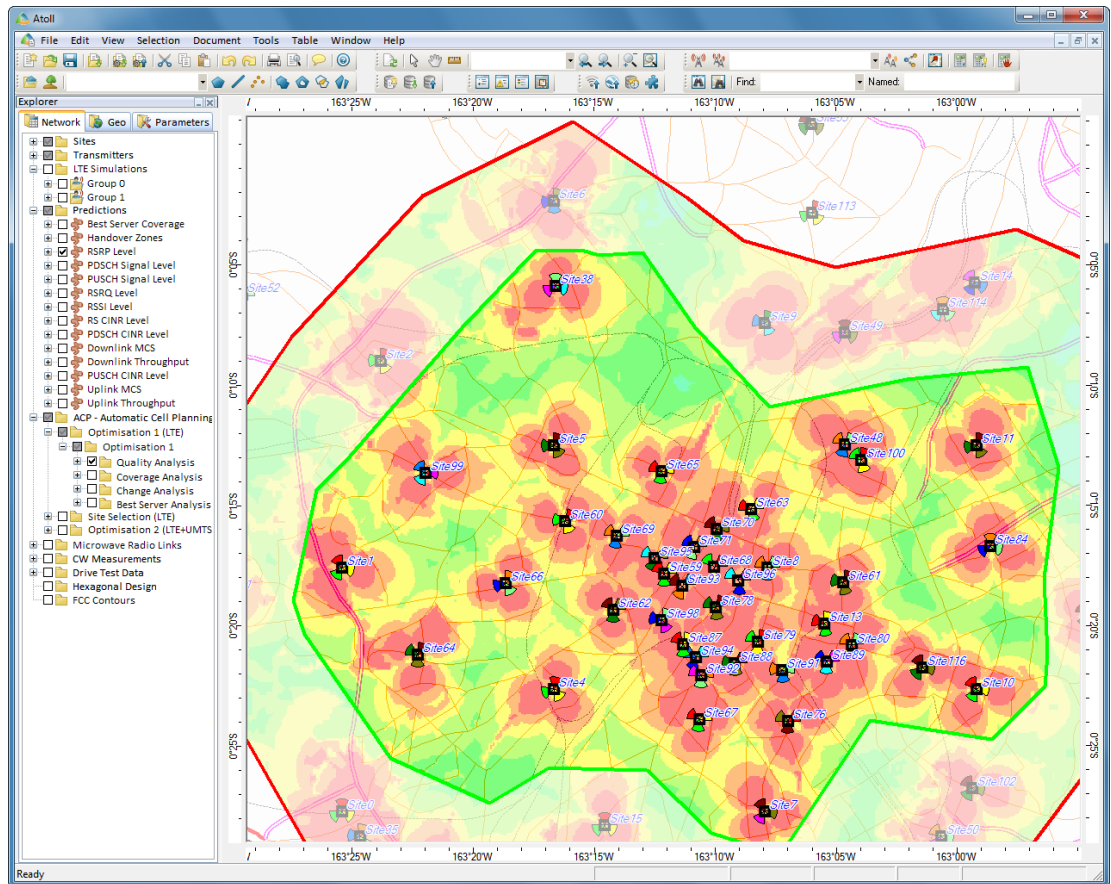


Рисунок 6 – Интерфейс системы Atoll

Возможности современных программных средств проектирования заключаются, в основном, в определении параметров подсистемы БС: географического местоположения БС, характеристик антенны (тип, высота подвеса, ориентация), мощности передатчика БС. Можно выделить следующие фазы планирования с помощью ПС:

- Определение общих параметров системы: размер зоны обслуживания, канальная емкость и стоимость создания ССС (в зависимости от стоимости выбирается мощность радиопередатчиков и интервал повторного использования частот).

- Выбор мест для размещения оборудования БС и расчет радиопокрытия для отдельных БС и системы в целом с использованием электронных карт местности и выбранной модели распространения радиоволн, а также определение и задание параметров БС (тип, ориентация и высота антенн, мощность). Карта

радиопокрытия оценивается экспертами и, в случае необходимости, данная фаза повторяется.

– Назначение частот для БС. Количество частот, выделяемых одной БС, определяется с учетом плотности абонентов и допустимой вероятности блокирования вызова.

– Анализ результатов проектирования – определение параметров качества обслуживания абонентов.

Международный союз электросвязи (МСЭ) для анализа технических аспектов качества работы сети рекомендует использовать следующие параметры: вероятность блокировки вызова, вероятность разрыва связи при хэндовере, время на установление соединения между МС и БС. В перечисленных компьютерных средствах проектирования сотовых сетей учитывается ограниченное количество показателей качества обслуживания. Чаще всего рассчитывается вероятность блокирования вызова из-за недоступности ресурсов и вероятность разрыва соединения при хэндовере [121].

Как видно из проведенного анализа систем частотно-территориального планирования радиосетей, все они обладают тремя существенными недостатками:

а) все вышеперечисленные системы не являются кроссплатформенным программным обеспечением, то есть их применение ограничено рамками семейства ОС Windows;

б) отсутствует общая задача оптимизации – оптимизация сети связи осуществляется путем решения частных задач и возврата к предыдущим фазам планирования и полным перерасчетом архитектуры ССС;

в) во всех системах не до конца реализована функция полностью автоматического планирования радиосети (в некоторых системах реализована только половина – автоматическое частотное планирование).

1.3. Постановка задачи исследования

Задача покрытия территории сетью базовых станций может быть сформулирована следующим образом: на заданной территории необходимо обеспечить предоставление услуг, определить места установки БС и выбрать их параметры таким образом, чтобы каждая точка (пользователь) в зоне обслуживания получала достаточно сильный сигнал. Так как стоимость каждой БС может зависеть от места ее установки и конфигурации, то решением поставленной задачи обычно является минимизация общей стоимости развертывания системы с учетом обеспечения заявленных услуг на всей зоне обслуживания.

При проектировании сотовой радиосети необходимо учитывать множество аспектов, включающее расчеты трафика, распространение сигналов, расположение антенн, распределение емкости, контроль мощности и интерференции [5, 114, 92]. Иногда можно найти оптимальное решение, удовлетворяющее всем критериям. Однако чаще всего критерии несогласованы друг с другом и изменения в одном критерии ведут к изменениям в других. В таком случае в качестве решения будет выбран компромисс между заданными критериями. При этом инженеру планирования необходимо рассматривать наилучшие возможные варианты построения телекоммуникационной сети.

Целью данной диссертационной работы является повышение эффективности процесса проектирования радиосетей за счет его оптимизации и автоматизации.

Исходя из поставленной цели были определены следующие задачи:

- обзор и исследование существующих методов проектирования радиосетей;
- обоснование методов многокритериальной оптимизации для выбора оптимальных проектных решений при проектировании сети радиосвязи;
- определение критериев оптимальности для решения задачи многокритериальной оптимизации при проектировании радиосети;

- исследование, сравнение, синтез и тестирование алгоритмов оптимизации, улучшающих эффективность и универсальность решения задач оптимизации;
- разработка многокритериального оптимизационного подхода, подходящего для автоматизации процесса проектирования радиосетей;
- разработка методики планирования покрытия с помощью генетических алгоритмов;
- разработка структуры комплекса программ, реализующего предложенные модели и методики оптимизации для задачи проектирования сотовых сетей связи;
- практическая апробация разработанного программного комплекса на предприятии, анализ результатов внедрения.

В связи с отсутствием эффективных методов автоматизации процесса проектирования радиосетей различных типов и оптимизации принципов их организации и функционирования и в соответствии с поставленными задачами исследования, была сформирована научная задача синтеза сети радиосвязи, позволяющая построить оптимизационную функцию с соответствующими ограничениями, в формализованном виде это будет выглядеть следующим образом:

Найти такую сеть радиосвязи S'' , которая удовлетворяет исходным требованиям (ограничениям) и обладает при этом значением совокупности (вектора) показателей качества $\bar{K}(S'')$, наилучшим в смысле безусловного критерия предпочтения, который имеет вид

$$\bar{K}(S'') \leq \bar{K}(S') \quad (1)$$

Если выполняется условие (1), то каждый из показателей качества $k_i(S'')$, $i = \overline{1, m}$ оптимизированной сети S'' не хуже, чем у исходной сети S' , в том числе, по меньшей мере, один из этих показателей качества лучше, чем у сети S' .

В данной постановке задача синтеза сети относится к задаче векторной (многокритериальной) оптимизации и заключается в выборе из нескольких вариантов векторно-сравнимых решений такого, при котором сеть обладает

наилучшими значениями вектора показателей качества $\bar{K}(S)$, где S – набор характеристик сети радиосвязи [21].

Для уменьшения сложности задачи, можно сделать допущение, что при прочих равных условиях, чем ниже стоимость сети, тем она лучше. Данное допущение имеет под собой практическое обоснование – если в процессе синтеза стоимость сети удалось снизить на единицы процентов при выполнении сетью заданных требований, то это может дать десятки и даже сотни миллионов рублей экономии. Также при этом важно обеспечить оптимальность частотного планирования в сети, так как использованные группы частот могут быть задействованы на последующих этапах расширения сети. Поэтому при выполнении условий (1) в процессе синтеза сети требуется оптимизировать аппаратный (стоимость) и частотный (количество частотных каналов, используемых сетью) ресурсы сети. Если в ходе решения задачи синтеза вскрыется противоречие между этими показателями, то следует один из показателей качества перевести в разряд ограничений.

Успешно решить поставленную выше задачу синтеза сети можно лишь путем сочетания методов математического синтеза, связанного с существенной идеализацией сети, с эвристическим синтезом, под которым понимается сложный творческий процесс, заключающийся в отыскании приемлемых решений на основе использования накопленных данных и инженерного опыта.

2. Многокритериальный подход к управлению частотно-территориальным планированием сетей сотовой связи

2.1. Общий подход и принципы многокритериальной оптимизации

Каждой задаче выбора присущи определенные общие элементы. Во-первых, для осуществления выбора должно быть задано множество возможных решений (вариантов) X . Для наличия выбора, в это множество должно входить хотя бы два элемента, ограничений сверху нет.

Под выбором решения понимают указание среди допустимых такого решения, которое является наилучшим. Часто возникают ситуации, когда происходит выбор не одного, а определенного набора решений, являющихся подмножеством множества X .

Множество выбираемых решений $C(X)$ представляет собой решение задачи выбора. Таким образом, решение задачи заключается в отыскании множества $C(X), C(X) \subset X$.

Во-вторых, процесс выбора невозможен без наличия того, кто осуществляет этот выбор. Человека или нескольких, ответственных за выбор наилучшего варианта, называют лицом, принимающим решение (ЛПР).

Как правило, считается, что лучшим решением является такое, которое наиболее полно удовлетворяет запросам ЛПР. В математических терминах цель выражается в виде максимизации или минимизации некоторой функции, заданной на множестве X . В некоторых случаях рассматривается сразу несколько подобных функций. Таким образом, в задаче выбора задан набор числовых функций $f_1, f_2, \dots, f_m, m \geq 2$ (для многокритериальной задачи), определенных на множестве возможных решений X , называемых критериями оптимальности или целевыми функциями (если рассматривать многокритериальную задачу как набор отдельных оптимизационных задач). Перечисленные функции образуют векторный критерий

$$f = (f_1, f_2, \dots, f_m), \quad (2)$$

принимаящий значения из критериального пространства (пространства оценок) m -мерных векторов R^m , всякое значение $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \in R^m$ называют векторной оценкой возможного решения x . В задачах поиска оптимального решения рассматривают множество возможных оценок $Y = f(X) = \{y \in R^m \mid y = f(x), x \in X\}$ и множество выбираемых векторов $C(Y) = f(C(X)) = \{y \in Y \mid y = f(x), x \in C(X)\}$. Обычно, между множествами X и Y можно установить однозначное соответствие.

Под многокритериальной задачей обычно подразумевают задачу, включающую множество допустимых решений X и векторный критерий f .

Как было отмечено выше, любая задача выбора связана с ЛПР и его предпочтениями. Если из двух возможных решений ЛПР выбирает одно, то считают, что эти решения связаны между собой отношением строгого предпочтения $x' \succ_x x''$. Отношение предпочтения, заданное на множестве решений X порождает отношения предпочтения на множестве векторов Y , вектор $y' = f(x')$ более предпочтителен вектора $y'' = f(x'')$, т.е. $y' \succ_y y''$, только тогда, когда $x' \succ_x x''$.

Таким образом, постановка задачи многокритериальной оптимизации включает:

- множество возможных решений X ;
- векторный критерий f ;
- отношения предпочтения $\succ_x$.

Задача многокритериального выбора состоит в отыскании множества выбираемых решений $C(X), C(X) \subset X$, с учетом его отношения предпочтения $\succ_x$ на основе заданного векторного критерия f , отражающего набор целей ЛПР [43, 34, 11].

2.2. Постановка задачи планирования на основе моделей многокритериального выбора

Современные телекоммуникационные сети, независимо от их принципа организации и типа, становятся все более сложными и обладают большим

набором специфических характеристик. Новое поколение телекоммуникационных сетей используется в огромном количестве как обычных систем, так и систем реального времени. Все эти системы обладают своими наборами требований к качеству сервиса в терминах пропускной способности, надежности, времени отклика, джиттера и т.д. Таким образом, телекоммуникационная сеть является информационной системой, включающий в себя упорядоченный набор элементов, отношений и их свойств. Для обеспечения функционирования подобных систем, необходимо осуществлять долгосрочное предварительное планирование (проектирование структуры системы и задание отношений) и краткосрочный операционный контроль функционирования системы. Задача оптимального планирования, проектирования и управления телекоммуникационной сети включает в себя определение начального набора решений, формирование подмножества возможных вариантов системы, задание критерия оптимальности и выбор варианта структуры и параметров системы, оптимальных по каждому критерию. Такая задача является задачей принятия решения на множестве доступных альтернативных вариантов и ее решение невозможно без использования системного подхода и методов многокритериальной оптимизации. Данные методы используются на всем жизненном цикле сети радиосвязи от ее создания до модернизации на этапе эксплуатации.

Для формализации задачи проектирования радиосети составляется математическое описание условий работы, ограничений на эти условия, выбираются показатели качества системы и критерий оптимальности. Такая постановка задачи позволяет использовать методы моделирования и многокритериальной оптимизации при выборе проектных решений [78, 67].

Таким образом, задачу планирования оптимальной ССС в терминах многокритериальной оптимизации можно представить в следующей форме: необходимо выбрать такой проектный вариант сотовой сети, который будет удовлетворять совокупности исходных данных и при этом обеспечивает наилучшее значение вектора показателей качества $\vec{K}$ по выбранному критерию

предпочтения. В качестве исходных данных для проектирования используются следующие: предполагаемое число абонентов сети и объемы трафика, выделенная полоса частот, требования по качеству предоставляемых услуг, информация о существующей инфраструктуре, электронные карты местности и т.д.

2.3. Выбор показателей качества

Любая сеть сотовой мобильной связи, как было указано ранее, характеризуется вектором показателей качества $\vec{k} = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$.

Под показателем качества подразумевается характеристика сети, связанная с ее качеством монотонной зависимостью – при увеличении показателя, увеличивается общее качество системы при прочих равных условиях. Если при изменении параметра качество системы изменяется немонотонно или не изменяется, то такой параметр не относится к показателям качества и его нельзя использовать при многокритериальной оптимизации.

При проектировании системы задача выбора совокупности показателей качества является одной из самых сложных и ответственных. Это объясняется тем, что для точной и полной оценки качества системы, ее необходимо характеризовать не каким-то одним числом, а совокупностью показателей [20]. Практически всегда в таком случае возникают противоречия между связанными показателями, и улучшения одних показателей приводит к ухудшению других. Таким образом, выбор оптимального варианта является далеко не тривиальной задачей. Так, например, противоречат друг другу следующие показатели: вероятность блокировки P_{bl} и количество обслуживаемых абонентов N_a , количество БС в системе N_{BTS} и ширина полосы частот ΔF и т.д.

На разных этапах проектирования ССС используют различные показатели качества [66, 19]. Для оптимизации ССС на номинальном этапе проектирования обычно используют следующие показатели [75]:

- N_a – количество обслуживаемых абонентов;
- S_o – площадь обслуживаемой территории;

- $\frac{N_a}{S_o}$ – плотность обслуживаемых абонентов;
- $P_{ош}$ – вероятность ошибки;
- N_k – количество частотных каналов;
- A – допустимая нагрузка;
- $N_{БС}$ – количество БС;
- ΔF_C – полоса частот БС на передачу;
- $N_{aБС}$ – количество абонентов, обслуживаемых одной БС;
- β – максимальная активность одного абонента в час наибольшей нагрузки;
- $P_{бл}$ – допустимая вероятность блокировки;

При проектировании и оптимизации системы можно использовать не все указанные показатели качества, а только наиболее целесообразные в каждом конкретном случае.

На этапе послепусковой оптимизации можно выделить следующие параметры, характеризующие качество сети:

- площадь покрытия сети;
- емкость сети;
- вероятность блокировки;
- относительное число успешных вызовов;
- относительное число срывов соединений;
- относительное число удачных хендверов;
- качество вызова.

Большинство из этих показателей можно измерить лишь при тестовой эксплуатации сети, поэтому для начального этапа проектирования они не используются.

Для решения задачи оптимального проектирования сети сотовой связи обычно используют показатели, приведенные к стандартной форме – нормированные, безразмерные и отвечающие следующим условиям [19, 37]:

$$-k_i > 0;$$

– чем меньше значение k_i , тем лучше система при прочих равных условиях;

– у идеальной (по данному показателю) системы $k_i \rightarrow 0$;

Для приведения показателей к стандартному виду, необходимо нормировать значения k_i к максимальным значениям $k_{i\max}$:

$$k_{in} = \frac{k_i}{k_{i\max}}. \quad (3)$$

Таким образом, значения показателя станут безразмерными и будут находиться в интервале от 0 до 1.

После этого все показатели приводятся к сопоставимому виду, то есть соответствия их условию минимизации целевой функции. Для показателей, повышающих качество системы при их максимизации, выполняется следующее преобразование:

$$k_{ic} = 1 - k_i. \quad (4)$$

2.4. Выбор критериев оптимальности

Предположим, что система $\varphi = (s, \vec{\beta}) \in \Phi_D$ определяется структурой s (набор элементов и соединений) и вектором параметров $\vec{\beta}$. Для информационной системы должен быть задан набор входных воздействий X и выходных результатов Y . Всю систему можно представить в виде функции отображения $\varphi: X \rightarrow Y$. Предполагается, что в процессе проектирования разрабатывается точное описание системы $\varphi \in \Phi$. Так, в частности, при формулировании задачи, составляется математическое описание условий и целей функционирования системы. Также задаются ограничения на условия, структуру $s \in S_D$, параметры $\beta \in B_D$ и на показатели качества системы, что определяет набор допустимых проектных решений $\Phi_a = S_a \times B_a$.

Существует большое количество способов задания подобных множеств, например:

- Неявное задание с помощью ограничения в зависимости от условий эксплуатации, сформулированных в строгой математической форме;
- Перечисление допустимых вариантов системы;
- Определение формального механизма для генерации вариантов системы.

Выбор критерия оптимальности тесно связан с формализацией понятия оптимальности. Существуют два подхода к описанию предпочтения лицом принимающего решения (ЛПР) одного варианта другому: ординалистический и кардиналистический.

Ординалистический подход основан на введении бинарных отношений между парами возможных решений [41, 42]. В этом случае, предпочтения ЛПР представляют собой бинарные отношения R на множестве Φ_D , которые отражают знания ЛПР о том, что решение φ' лучше, чем альтернативное решение φ'' : $\varphi' R \varphi''$.

Предположим, что ЛПР придерживается отношений строгого предпочтения ($\succ$), которое является ассиметричным и транзитивным, и принимает решения на множестве альтернатив Φ_D . Решение $\varphi_0 \in \Phi_D$ называется оптимальным в том случае, когда не существует других решений $\varphi \in \Phi_D$, для которых выполняется отношение $\varphi \succ \varphi_0$. Множество оптимальных по отношению $\succ$ решений обозначают как $opt_{\succ} \Phi_D$. Это множество может включать в себя либо один элемент, либо конечное или бесконечное количество элементов в зависимости от структуры множества Φ и свойств отношения $\succ$.

Кардиналистический подход заключается во введении для каждой альтернативы $\varphi \in \Phi_D$ некоторого числа U , отражающего полезность (ценность) решения φ [41, 42]. Каждая целевая функция задает отношение порядка (предпочтения) R (является индикатором предпочтения) на множестве $\Phi_D(\varphi' R \varphi'')$, если выполняется условие $U(\varphi') \geq U(\varphi'')$. В данном случае может быть введена некоторая скалярная функция (критерий оптимальности),

оптимизация которой приведет к выбору единственного наилучшего варианта системы.

Выбор критерия оптимальности основан на представлениях ЛПР об оптимальности. Однако, из-за недостаточной определенности не всегда удастся формализовать целевую функцию и скалярный критерий оптимальности. В таком случае невозможно выбрать единственный оптимальный вариант $\varphi_0 = \underset{\varphi \in \Phi_D}{extr}[U(\varphi)]$, где $U(\varphi)$ - целевая функция полезности системы. Тогда, на начальных этапах планирования, система характеризуется совокупностью целевых функций:

$$\vec{f}(\varphi) = (f_1(\varphi), f_2(\varphi), \dots, f_m(\varphi)), \quad (5)$$

которая определяет влияние структуры s и параметров $\vec{\beta}$ варианта системы $\varphi = (s, \vec{\beta})$ на показатели качества системы.

В таком случае возникает подкласс более сложных задач оптимизации решений по показателям качества, называемый многокритериальной или векторной оптимизацией [42, 54]. В основном, постановка и решение задачи многокритериальной заключается в замене (аппроксимации) представлений ЛПР об оптимальности системы на различные концепции оптимизации, которые могут быть формализованы в виде некоторого вектора критериев оптимальности (5) и такая задача может быть решена с использованием эффективных процедур оптимизации.

2.5. Формирование множества допустимых вариантов системы

При оптимизации информационных систем, представленных в виде их разложения на подсистемы, целесообразно использовать морфологический подход, который широко применяется в проектировании сложных систем [21, 25]. В этом случае предполагается, что любой вариант системы имеет определенную структуру, т.е. состоит из конечного числа элементов (подсистем), и распределение системных функций среди них могут быть выполнены с помощью конечного числа методов.

Рассмотрим особенности формирования множества допустимых вариантов системы. Будем считать, что функциональная декомпозиция системы в виде набора элементов представлена в следующем виде:

$$\{\varphi_j, j = \overline{1, L}, \bigcup_{j=1}^L \varphi_j = \varphi\}.$$

Что означает разбиение конечного набора элементов системы E на L морфологических классов $\sigma(l), l = \overline{1, L}$ таких, что $\sigma(l) \cap \sigma(l') = \emptyset$ при $l \neq l'$.

Введем понятие морфологического пространства $\Lambda \subseteq 2^E$, все элементы которого являются морфологическими вариантами системы $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_L)$. Каждый морфологический вариант φ представляет собой определенный набор экземпляров класса $\varphi(l) \in \sigma(l)$. В данном случае для любого $\varphi \in \Lambda$ и любого $l = \overline{1, L}$ множество $\varphi \in \Lambda$ содержит один элемент.

Предположим, что существует множество способов реализации каждой подсистемы $\varphi_{lk}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}$, тогда можно заполнить следующую морфологическую таблицу:

Таблица 6 – Морфологическая таблица

Морфологические классы	Возможные способы реализации подсистемы	Количество способов реализации системы
$\sigma(1)$	$\varphi_{11}, \varphi_{12}, \dots, \varphi_{1K_1}$	K_1
$\sigma(2)$	$\varphi_{21}, \varphi_{22}, \dots, \varphi_{2K_2}$	K_2
...	...	...
$\sigma(l)$	$\varphi_{l1}, \varphi_{l2}, \dots, \varphi_{lK_l}$	K_l
...	...	...
$\sigma(L)$	$\varphi_{L1}, \varphi_{L2}, \dots, \varphi_{LK_L}$	K_L

Общее количество возможных морфологических вариантов системы можно определить так: $Q = \prod_{l=1}^L K_l$.

При формировании множества допустимых вариантов системы Φ_D необходимо учитывать ограничения, накладываемые на структуру, параметры и техническую реализацию элементов системы и систему в целом, а также допустимые варианты соединений элементов и ограничения на значения показателей качества системы. При учете всех этих показателей возникают противоречия в требованиях. С одной стороны, желательно, представить все возможные варианты системы во всей их полноте, чтобы не пропустить потенциально лучшие варианты. С другой стороны, существуют ограничения, предусмотренные значением допустимых расходов (времени и средств) на проектирование системы.

После определения множества возможных вариантов системы в терминах конкретной структуры, вычисляются значения показателей качества, выделяется множество Парето-оптимальных вариантов, которое затем сужается до единственного, наиболее предпочтительного, варианта [54].

2.6. Нахождение Парето-оптимальных вариантов системы

Каждый вариант φ системы, представленной в виде совокупности целевых функций, отображается из множества допустимых вариантов Φ_D в критериальное пространство оценок $V \in R^m$:

$$V = \vec{K}(\Phi_D) = \{\vec{v} \in R^m \mid \vec{v} = \vec{k}(\varphi), \varphi \in \Phi_D\} \quad (6)$$

В данном случае, каждому варианту φ соответствует оценка выбранных показателей качества $\vec{v} = \vec{k}(\varphi)$ (6) и наоборот.

В критериальном пространстве оценок V отношению строгого предпочтения $\succ$ из множества Φ_D соответствует отношение $\geq$. Исходя из аксиомы Парето, для двух любых оценок $\vec{v}', \vec{v}'' \in V$, удовлетворяющих неравенству $\vec{v}' \geq \vec{v}''$, всегда существует отношение $\vec{v}' \succ \vec{v}''$. И также, отношение $\varphi' \succ \varphi''$ существует для любых двух вариантов системы, для которых выполняется неравенство $\vec{k}(\varphi') \geq \vec{k}(\varphi'')$. Аксиома Парето накладывает

определенные ограничения на характер предпочтений в многокритериальной задаче.

Для потребителя было бы желательным получить наилучшие значения по всем заданным показателям качества, однако, на практике такая ситуация очень редка. Необходимо отметить, что целевые функции (показатели качества) могут быть трех видов: нейтральные, согласованные между собой и конкурирующие между собой. В первых двух случаях возможна оптимизация по каждому критерию в отдельности. В третьем такая возможность отсутствует и может быть достигнут лишь согласованный оптимум – оптимум по критерию Парето, который подразумевает, что каждый из показателей в дальнейшем может быть улучшен только путем снижения остальных показателей качества системы. Для оптимума по Парето в пространстве критериев соответствует множество Парето-оптимальных оценок, которые удовлетворяют следующему выражению:

$$P(V) = \text{opt}_{\geq} V = \{\vec{k}(\varphi^0) \in R^m \mid \forall \vec{k}(\varphi) \in V : \vec{k}(\varphi) \geq \vec{k}(\varphi^0)\} \quad (7)$$

Оптимум по критерию Парето можно найти в соответствии с выражением (7) путем полного перебора всех возможных вариантов системы Φ_D или используя специальные методы, например, весовой метод, метод рабочих характеристик, метод последовательных уступок и др. [81, 35, 32].

Формальная постановка задачи оптимизации по Парето не содержит информации для выбора единственной альтернативы. В данном случае набор допустимых вариантов сужается до набора Парето-оптимальных решений путем отбрасывания худших альтернатив. Для решения проблемы сужения подмножества Парето-оптимальных вариантов системы существует множество различных подходов, например, основанных на теории полезности, теории нечетких множеств, лексикографическом сравнении [93, 3].

2.7. Методы нахождения оптимальных вариантов построения сети

2.7.1. Направленные (прямые) методы

Множество методов многомерной оптимизации обычно различают по виду информации, которая используется ими при работе [4, 16]:

- методы прямого поиска (методы нулевого порядка);
- градиентные методы (методы первого порядка);
- ньютоновские методы (методы второго порядка).

Ни один из методов перечисленных классов не отличается высокой эффективностью при решении оптимизационных задач различных типов. Так, в некоторых случаях при реализации этих методик на ЭВМ может происходить переполнение памяти, вычисление целевой функции может требовать чрезмерных затрат времени или может требоваться недостижимая точность вычислений [60]. Для задачи планирования радиосети трудность будет представлять аналитическое выражение для производных целевой функции. Таким образом, инженеру-проектировщику необходимо приспосабливать применяемый метод к параметрам конкретной решаемой задачи.

Для методов прямого поиска необходимы только значения функции и не используется никакая внутренняя модель целевой функции. Методы, основанные на вычислении значений функции можно разделить на эвристические (поиск по симплексу, метод Хука-Дживса и др.) и теоретические (метод сопряженных направлений Пауэлла). Эвристические методы реализуют процедуры поиска с помощью интуитивных геометрических представлений, а теоретические – основаны на фундаментальных математических теоремах и при выполнении определенных условий обладают свойством сходимости.

Некоторые методы прямого поиска прошли проверку временем и являются эффективными процедурами, применяемыми на практике. Главным достоинством этих процедур является не теоретическое доказательство сходимости или скорости сходимости, а простота реализации и доказанность их работоспособности при решении практических задач, а также отсутствие сложных подготовительных этапов (например, вычисления первых и вторых производных).

Задачу многомерной оптимизации можно записать в следующем виде: требуется найти вектор $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, доставляющий минимум функции с заданной точностью ε , используя численный метод решения, $x \in R^n$ [16, 36]. В многомерном случае отыскание экстремумов существенно усложняется, так как у рассматриваемой задачи возникают новые стороны:

- функция $F(x)$ может приобрести сложную форму;
- возникает бесконечное количество возможных направлений поиска и, соответственно, задача выбора направления;
- переменные $x_1, x_2, \dots, x_n$ могут оказаться взаимосвязаны;
- область допустимых значений может принимать всевозможные формы.

Как было сказано ранее, проектирование оптимальной сотовой сети связи является многокритериальной задачей и для ее решения с помощью прямых методов оптимизации необходимо осуществить свертку критериев с использованием линейного соотношения. Этот метод решения многокритериальной задачи является простым и, в некоторых случаях, достаточно эффективным, однако обладает рядом недостатков, которые будут более подробно рассмотрены в следующем разделе и не подходит для решения поставленной задачи проектирования радиосети.

2.7.2. Применение метода исследования пространства параметров

Еще одним из эффективных методов решения многокритериальной задачи оптимизации является разработанный в 1981 году И.М. Соболев и Р.Б. Статниковым метод исследования пространства параметров [81, 84].

Для отыскания точек из допустимого и паретовского множеств применение направленных методов оптимизации (например, градиентных) может оказаться неэффективным. Для рассматриваемого класса задач целесообразны методы, позволяющие «зондировать» множество параметров точками последовательности, равномерно распределенной в параллелепипеде параметрических ограничений

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}, j = \overline{1, r}. \quad (8)$$

При функциональных ограничениях, записанных в виде:

$$c_l^* \leq f_l(\alpha) \leq c_l^{**}, l = \overline{1, t}, \quad (9)$$

где c_l^*, c_l^{**} – ограничения нормативного вида, которые нельзя нарушать.

Применение таких последовательностей при хороших характеристиках равномерности и достаточном количестве их точек позволяет эффективно «просматривать» пространство параметров. А значит, вычисляя значения критериев в этих точках, можно иметь довольно полную информацию об исследуемой системе.

Исследование пространства параметров состоит из трех этапов [81, 84].

Первый этап – составление таблиц испытаний – выполняется ЭВМ. Выбираются N пробных точек $\alpha_1, \dots, \alpha_N$ равномерно расположенных в G . В каждой из точек α_i вычисляются все локальные критерии $\Phi_v(a_i)$. По каждому из них составляется таблица испытаний, в которой значения $\Phi_v(a_1), \dots, \Phi_v(a_N)$ расположены в порядке возрастания:

$$\Phi_v(a_{i_1}) \leq \Phi_v(a_{i_2}) \leq \dots \leq \Phi_v(a_{i_N}), \quad (10)$$

где указаны номера $i_1, i_2, \dots, i_N$ соответствующих пробных точек – номера испытаний (свои для каждого v).

Второй этап – выбор критериальных ограничений – предполагает вмешательство проектировщика (или заказчика). Рассматривая поочередно каждую из таблиц (10), он должен назначить критериальные ограничения Φ_v^{**} . Если выбрать все Φ_v^{**} слишком малыми, то множество допустимых точек D может оказаться пустым (т. е. задача неразрешима).

Третий этап, выполняемый на ЭВМ – проверка разрешимости задачи:

$$\Phi(P) = \min_{\alpha \in D} \Phi(\alpha), \quad (11)$$

где $\Phi(\alpha) = (\Phi_1(\alpha), \dots, \Phi_k(\alpha))$ – вектор критериев.

Зафиксируем какой-нибудь из критериев, например $\Phi_{v_1}(\alpha)$, и рассмотрим соответствующую ему таблицу (10). Пусть $s = s(v_1)$ – количество значений в этой таблице, удовлетворяющих выбранному критериальному ограничению:

$$\Phi_{v_1}(a_{i_1}) \leq \dots \leq \Phi_{v_1}(a_{i_s}) \leq \Phi_{v_1}^{**} \quad (12)$$

Путем перебора имеющихся значений $\Phi_{v_1}(a_{i_1}), \dots, \Phi_{v_1}(a_{i_s})$ при всех v нетрудно проверить, есть ли среди точек $\alpha_{i_1}, \dots, \alpha_{i_s}$ хотя бы одна такая, для которой справедливы одновременно все неравенства критериальных ограничений:

$$\Phi_v(\alpha) \leq \Phi_v^{**}, v = \overline{1, k} \quad (13)$$

Если такая точка есть, то множество D , определенное неравенствами (8) – (9), непусто и задача (11) разрешима. В противном случае следует вернуться ко второму этапу и потребовать от проектировщика (или заказчика) «уступок» при назначении Φ_v^{**} . Если такие уступки крайне нежелательны, можно вернуться к первому этапу и увеличить количество пробных точек, чтобы повторить второй этап с таблицами испытаний большего объема. Таким образом, задача проектирования ставится и решается в диалоговом режиме.

Для выбора пробных точек α_i целесообразно использовать равномерно распределенные в пространстве параметров последовательности (или сетки) $Q_1, Q_2, \dots$ с достаточно хорошими характеристиками равномерности и по возможности простыми алгоритмами для вычисления координат их точек.

Процесс выбора точек α_i протекает следующим образом. По декартовым координатам очередной точки $Q_i = (q_{i,1}, \dots, q_{i,r})$ находим декартовы координаты точки $\alpha_i = (\alpha_{i,1}, \dots, \alpha_{i,r})$, которая принадлежит Π :

$$\alpha_{ij} = \alpha_j^* + q_{i,j}(\alpha_j^{**} - \alpha_j^*), j = \overline{1, r} \quad (14)$$

При $\alpha = \alpha_i$ рассчитываем проектируемую систему и проверяем условия (9). Если они выполнены, то точка $\alpha = \alpha_i$ отбирается в качестве пробной и вычисляются все $\Phi_v(\alpha_i)$, в противном случае точка $\alpha = \alpha_i$ отбрасывается.

Пусть N – число точек α_i . Как правило, решающую роль при определении N играет время расчета системы. Однако если выбираются параметры машин, конструкций и систем, предназначенных для серийного и массового производства

или предназначенные для длительной эксплуатации, то любые (разумные) затраты времени для расчета точек оправданны.

По результатам исследования пространства параметров может быть построена корреляционная матрица $\|r_{\mu\nu}\|$ где $r_{\mu\nu}$ – коэффициент парной корреляции критериев $\Phi_\mu(\alpha)$ и $\Phi_\nu(\alpha)$. Эта матрица позволяет сравнительно просто оценить степень линейной зависимости между любыми двумя критериями. Так, если в этой матрице элемент $r_{\mu\nu} \approx 1, \mu \neq \nu$, то критерии Φ_μ и Φ_ν линейно зависимы. Данные ее исследования могут оказать помощь проектировщику при анализе допустимого множества решений [84].

Анализ таблиц результатов испытаний позволяет:

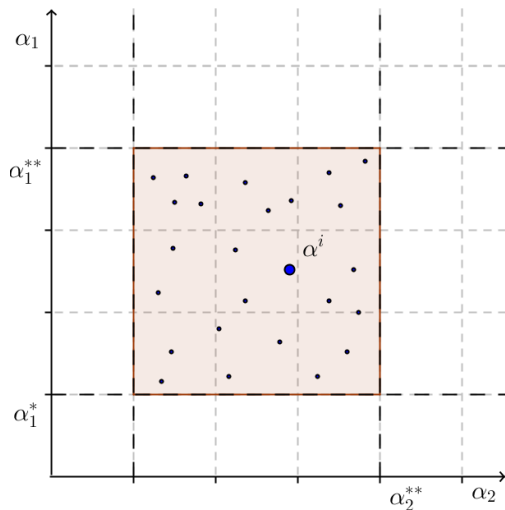
- обнаружить критерии, значения которых мало меняются;
- выявить зависимые или, наоборот, противоречивые критерии;
- установить влияние параметров на критерии качества и в ряде ситуаций попытаться улучшить значения тех или иных критериев за счет коррекции параметрических ограничений α_j^* и α_j^{**} ;
- определить взаимосвязь критериев друг с другом.

Однако к наиболее важным результатам следует отнести определение допустимого и парето-оптимального множеств решений, их неформальный анализ и нахождение наиболее предпочтительного варианта проекта.

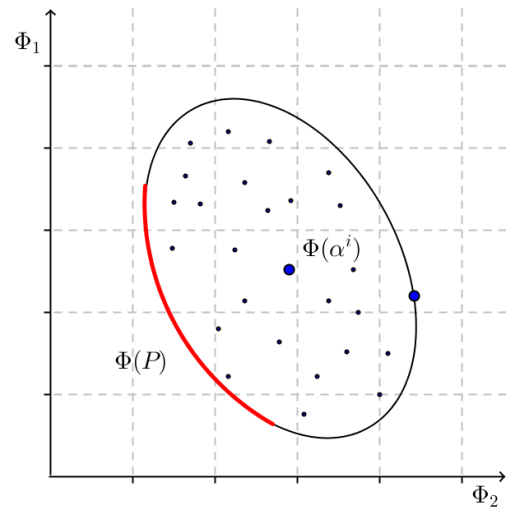
На основании анализа парето-оптимального множества определяется наиболее предпочтительный вариант α_0 . Множество Парето важно для задач векторной оптимизации, потому что, во-первых, проектировщику анализировать его легче, чем все допустимое множество, во-вторых, какой бы системой предпочтений ни пользовался проектировщик при сравнении разных векторов из допустимой области, оптимальный вектор всегда принадлежит множеству Парето.

Рассмотрим упрощенную динамику построения допустимого множества решений [81]. Предположим, что мы можем варьировать двумя параметрами (α_1 и

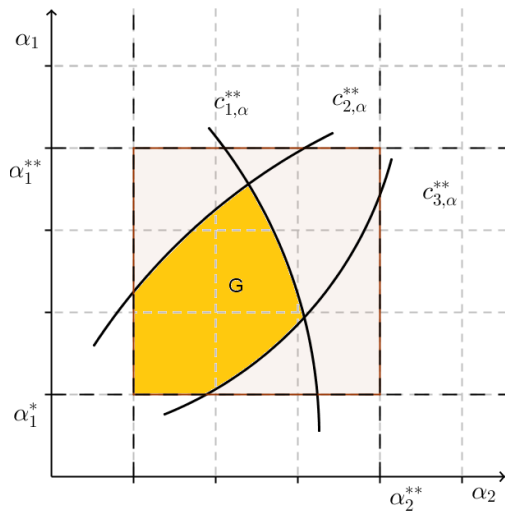
α_2), а качество проектируемого механизма оценивается двумя критериями (Φ_1 и Φ_2), которые зависят от параметров α_1 и α_2 (рис. 7). Критерии желательно минимизировать. Пусть мы имеем возможность генерировать на ЭВМ достаточно большое число вариантов проекта α^i и $\Phi(\alpha^i)$, $i = \overline{1, N}$, которые представлены на рис. 7, а, б в виде точек (на рис. 7, б – множество парето-оптимальных решений в пространстве критериев). Из-за наличия функциональных ограничений (предположим, что их три) $c_{1,\alpha}^{**}$, $c_{2,\alpha}^{**}$, $c_{3,\alpha}^{**}$ (рис. 7, в) первоначальное множество вариантов в параллелепипеде параметров становится меньше. На нем показана область $G \subset \Pi$, удовлетворяющая ограничениям функционального типа. В пространстве критериев на рис. 1, г $\Phi(G)$ – образ G . После определения G заказчик ищет допустимое множество решений D . На рис. 7, е показаны три шага заказчика. Первый шаг – $\Phi_{1,1}^{**}$, $\Phi_{2,1}^{**}$ и $D = \emptyset$. Заказчик делает уступку. Второй шаг – $\Phi_{1,2}^{**}$, $\Phi_{2,2}^{**}$ и в этом случае снова $D = \emptyset$. Наконец, на третьем шаге ($\Phi_{1,3}^{**}$, $\Phi_{2,3}^{**}$) оказывается $D \neq \emptyset$, $G \supset D$ (на рис. 7, д $\hat{\Phi}_1^{**}$ и $\hat{\Phi}_2^{**}$ – прообразы Φ_1^{**} и Φ_2^{**} в пространстве параметров).



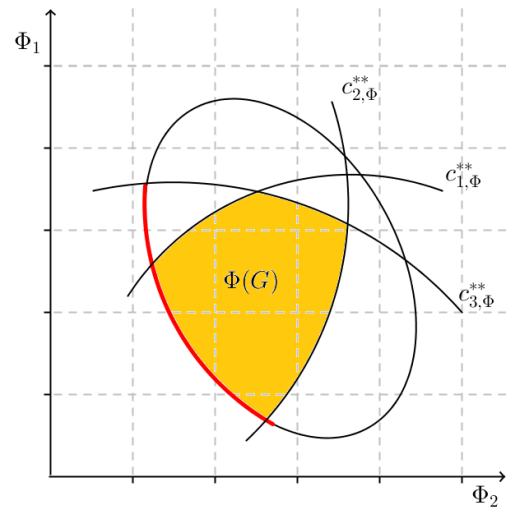
а



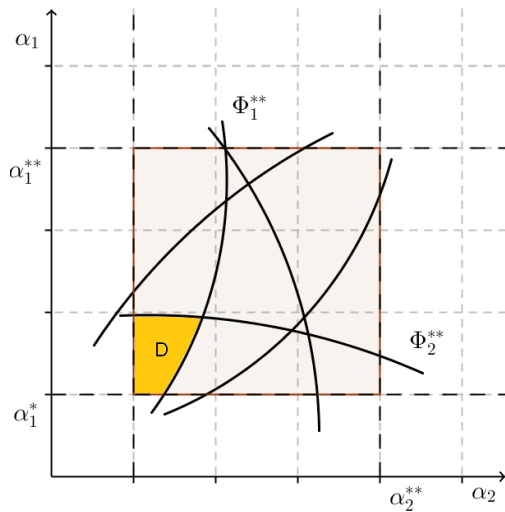
б



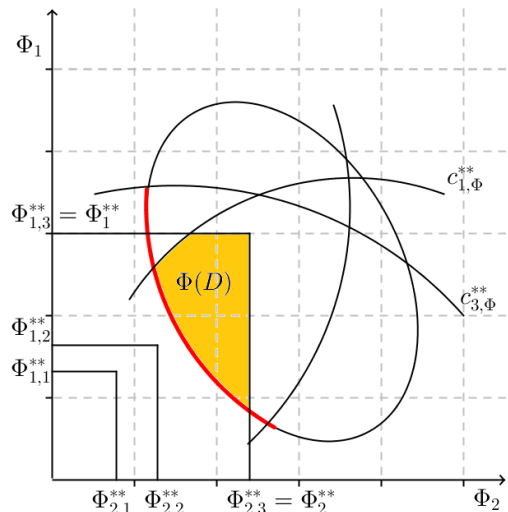
В



Г



Д



е

Рисунок 7 – Построение множества решений

Таким образом, исследуя множество D , заказчик многократно пересматривает приоритеты и изменяет представление о важности критериев. При изучении допустимого множества и заказчик, и проектировщик могут учесть факторы, которые не удалось формализовать.

Как видно, достоинством данного метода является то, что в ходе анализа пространства параметров поступает информация о качестве и пригодности математической модели и возможных ее корректировках. Однако такой пошаговый подход к оптимизации с постоянным взаимодействием заказчика и проектировщика слабо подходит для автоматизации.

2.7.3. Использование метаэвристик

2.7.3.1. Многокритериальная оптимизация с помощью генетических алгоритмов

В настоящее время для решения задач оптимизации появилось множество методов, называемых метаэвристиками – стратегий высокого уровня, управляющих эвристиками низкого уровня [128]. Различают методы траекторий (табу-поиск, моделируемый отжиг), сохраняющие одно решение и популяционные методы (методы муравьиной колонии, эволюционное моделирование), сохраняющие конечное множество (популяцию) решений [128, 24].

Как было сказано ранее, одним из методов решения многокритериальной задачи оптимизации является свертка критериев с использованием линейного соотношения. Допустим, эксперт считает, что стоимость конечного варианта в 5 раз значимее пропускной способности сети и в 3 раза значимее надежности, то тогда функцию приспособленности можно будет записать в виде следующей суммы [76]:

$$F(i) = K(i) + \frac{1}{5}P(i) + \frac{1}{3}C(i) \quad (15)$$

Очевидно, что у такого подхода есть ряд проблем. Первая из них – это необходимость определить соотношение критериев друг с другом, что очень сложно или невозможно, если критерии нелинейны. Так же в некоторых случаях рассмотрение взвешенной суммы не всегда показывает границу Парето. Например, рассмотрим случай, когда критерии просто суммируются. Рассмотрим два варианта решения, решение А находится близко к границе, поэтому является предпочтительным, однако сумма критериев для решения В будет больше, и в функции приспособленности будет выбрано именно оно (рис. 8)

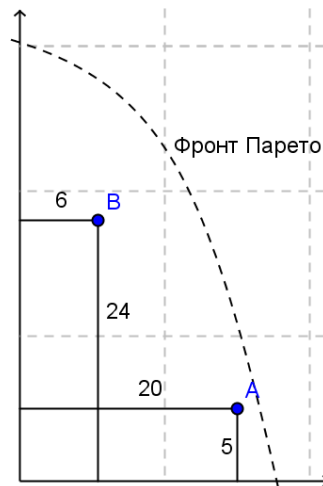


Рисунок 8 – Решения на границе Парето

Чтобы решить первую проблему, можно отказаться от составления линейной комбинации и рассматривать все критерии как несравнимые функции. В таком случае для упорядочивания критериев задаются предпочтения (один вариант сети объявляется лучшим, если значение, например, надежности выше, чем у другого, если они равны, то рассматривают другие критерии). Таким образом, можно составить алгоритм для процедуры селекции с использованием турнира. Определим функцию *ЗначениеКритерия*(критерий, особь), возвращающую качество особи для заданного критерия. Алгоритм получившейся турнирной селекции можно записать следующим образом:

Best:=случайная особь из популяции;

O:= $\{O_1, \dots, O_n\}$; // список критериев в порядке от наиболее важного к менее.

t:=размер турнира, $t \geq 1$;

Цикл по *i* с 2 до *t*:

Next:=случайная особь из популяции;

Цикл по *j* с 1 до *n*:

Если *ЗначениеКритерия*(*O_j*,*Next*)>*ЗначениеКритерия*(*O_j*,*Best*) то:

Best:= *Next*;

Конец внутреннего цикла;

Если *ЗначениеКритерия*(*O_j*,*Next*)<*ЗначениеКритерия*(*O_j*,*Best*) то:

Конец внутреннего цикла;

Результат:=Best;

Данный алгоритм можно усовершенствовать, добавив голосование: особь будет считаться лучшей, если она превосходит остальные по большему количеству критериев.

Для более точной оценки решений в многокритериальном смысле, в алгоритмах поиска необходимо использовать понятие доминирования по Парето. Простейший способ – использование основанного на Парето-доминировании оператора турнирной селекции. В общем виде такой алгоритм можно записать следующим способом:

P:=популяция;

P_a:=случайная особь из P;

P_b:=случайная особь из P;

Если *P_a доминирует P_b* то:

Результат:= P_a;

В противном случае Если *P_b доминирует P_a* то:

Результат:= P_b;

В противном случае:

Результат:= случайно выбранная особь P_a или P_b;

Если обе особи не доминируют друг друга по Парето, то они являются одинаково интересными для проектировщика, но в целях оптимизации необходимо выбрать только одну. Для решения этой задачи вводятся понятия рангов границы Парето и разреженности [128]. Особям, находящимся на границе, присваивается ранг 1. Если из популяции удалить эти особи и пересчитать границу, то ее особям будет присвоен ранг 2 и так далее (рис. 9).

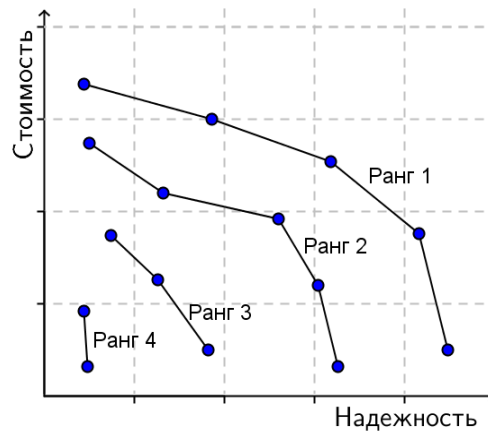


Рисунок 9 – Ранги границы Парето

После обработки всех особей, полученные ранги можно использовать в качестве функции приспособленности (чем ниже ранг, тем лучше):

$$Fitness(i) = \frac{1}{1 + РангГраницыПарето(i)} \quad (16)$$

Для особей с одинаковым рангом можно измерять расстояния между ними. В целях оптимизации необходимо, чтобы особи были распределены вдоль границы равномерно. Будем считать, что особь находится в разреженной области, если ближайшая к ней особь одного ранга располагается не слишком близко. Так для особи В разреженность выше чем для А, так как $A_1 + A_2 < B_1 + B_2$ (рис. 10).

Таким образом, необходимо определить турнирную селекцию так, чтобы первоначально особи отбирались по рангу Парето, а с помощью разреженности разрешались неоднозначные ситуации:

P :=популяция с посчитанными рангами границы Парето;

$Best$:=случайная особь из популяции;

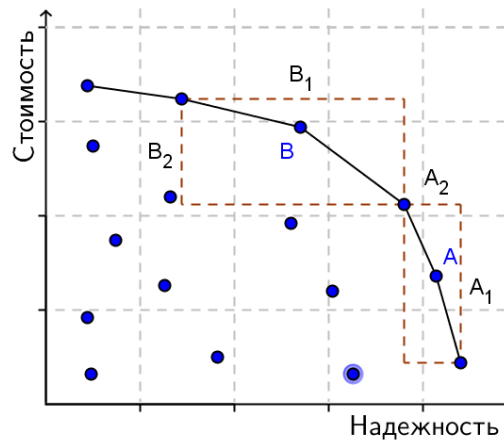


Рисунок 10 – Разреженность

t :=размер турнира, $t \geq 1$;

Цикл по i с 2 до t :

$Next$:=случайная особь из популяции;

Если $РангГраницыПарето(Next) < РангГраницыПарето(Best)$ то:

$Best := Next$;

В противном

Если $РангГраницыПарето(Next) = РангГраницыПарето(Best)$:

Если $Разреженность(Next) > Разреженность(Best)$:

$Best := Next$;

$Результат := Best$;

Еще один параметр, который можно использовать для вычисления приспособленности – Парето-сила, которая показывает количество особей, доминируемых по Парето данной особью. Однако сила не обязательно показывает, насколько близко особь располагается к границе и особь на границе может быть не такой сильной, как другие особи (рис. 11).

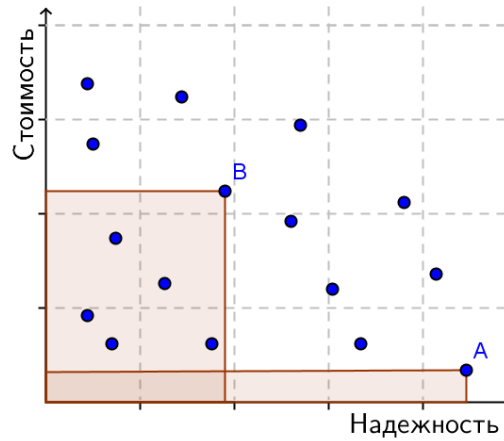


Рисунок 11 – Парето-сила

Для исключения таких случаев, можно использовать обратное понятия – слабость, определяемую как количество особей, доминирующих данную. Более удачной характеристикой будет общая слабость: суммарная общая сила всех особей, доминирующей данную [128]:

$$\text{Слабость}_{\text{общ}} = \sum_{g \in G} \text{Сила}(g), \quad (17)$$

где G – группа особей, доминирующих i .

Для получения оптимального результата необходимо, чтобы слабость была как можно меньше, тогда функцию приспособленности можно записать следующим образом:

$$\text{Fitness}(i) = \frac{1}{1 + \text{Слабость}_{\text{общ}}(i)} \quad (18)$$

Введем понятие предварительной приспособленности:

$$G_i = \text{Слабость}_{\text{общ}}(i) + \frac{1}{2 + d_i}, \quad (19)$$

где d_i – расстояние до ближайшего соседа, $k = \sqrt{\|P\|} + 1$.

Таким образом, если данная особь находится далеко от других, то значение приспособленности уменьшается для увеличения разнообразия популяции.

Алгоритм SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) [133, 130] на каждой итерации составляет архив из особей, находящихся на границе Парето.

Размер архива фиксирован и составляет n . Если особей недостаточно, то берутся следующие по приспособленности. Если особей слишком много, то отбрасываются те, у которых расстояние до ближайшего соседа минимально. Таким образом мы получаем архив с особями с границы Парето, располагающимися далеко друг от друга и от других особей. После заполнения создается новая популяция путем скрещивания особей из архива:

$m := \text{размер популяции};$

$a := \text{размер архива};$

$P := \text{популяция } \{P_1, \dots, P_m\};$

$A := \{\}$ архив;

Повторять:

$\text{РасчетПриспособленности}(P);$

$P := P \cup A;$

$\text{ЛучшаяГраница} := \text{граница } P;$

$A := \text{ЗаполнениеМассиваSPEA2}(P, a);$

$P := \text{Скрещивание}(A)$

до тех пор пока ЛучшаяГраница не идеальна или до конца заданного времени;

$\text{Результат} := \text{ЛучшаяГраница};$

2.7.3.2. Оптимизация проектных решений при планировании радиосетей

На рисунке отражено генетическое представление беспроводной сети для использования в SPEA2. В генетическом алгоритме передатчики БС и их зоны обслуживания представлены как особи, а набор передатчиков – беспроводная сеть в целом – представляет собой популяцию. Генетическое отображение радиосети представляет собой иерархию, на нижнем уровне которой находятся хромосомы, которые кодируют характеристики передатчиков – расположение, мощность, емкость и т.д. Эти данные кодируются бинарно с помощью годов Грея. Уровнем

выше находятся особи, и еще выше – популяции, отражающие альтернативные варианты архитектуры системы. Вершина иерархии – метапопуляция – набор всех популяций в любой момент времени (рис. 12).

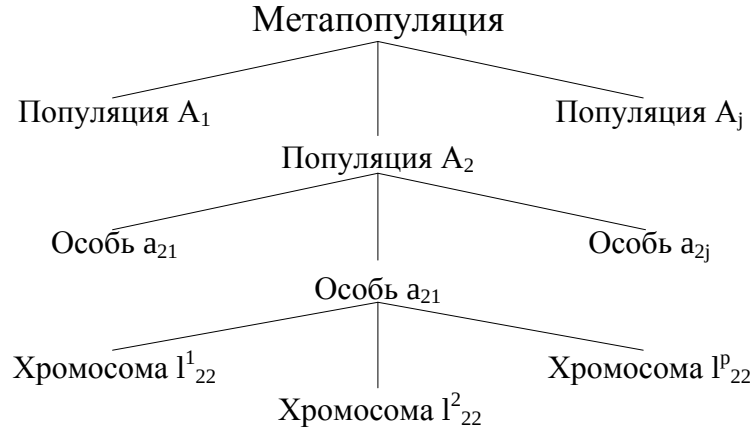


Рисунок 12 – Структура генетического представления беспроводной сети

В более формализованном представлении, основной компонент ГА – особь, представляющую в данном случае передатчик БС можно записать в виде вектора $\vec{a}_{ij} = \{I_{ij}^1, \dots, I_{ij}^p\}$, где I_{ij}^k – атрибут k организма i из популяции j , а p – номер атрибута данного организма. Таким образом, популяция A_j^t во время t , представляющая собой один вариант конфигурации системы передатчиков, может быть записана в виде вектора размерности n $\{a_{1j}, \dots, a_{nj}\}$, где n – размер популяции – число особей в популяции, или в виде следующей матрицы:

$$A_j^t = \begin{Bmatrix} I_{1j}^1 & \dots & I_{1j}^p \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{nj}^1 & \dots & I_{nj}^p \end{Bmatrix}$$

Данная матрица имеет размерность $p \times n$ по числу атрибутов (хромосом) каждой особи и числу особей в популяции. Метапопуляцию можно представить в виде трехмерной матрицы $p \times n \times t$, где t – число популяций.

Так, в качестве иллюстрации, два альтернативных варианта архитектуры системы можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} & [\{(10.0, 15.0, R), (20.0, 30.0, R), (2.0, 3.0, R)\}; \\ & \{(7.0, 5.0, R), (15.0, 2.0, R), (20.0, 14.0, R)\}] \end{aligned}$$

где в фигурных скобках записана система-популяция, в круглых – передатчик-особь и в квадратных – метапопуляция. В данном примере каждый одиночный передатчик обладает тремя атрибутами-генами – два для координат X и Y и одним для радиуса зоны обслуживания R.

В общем виде схема поиска решения будет выглядеть следующим образом (рис. 13):

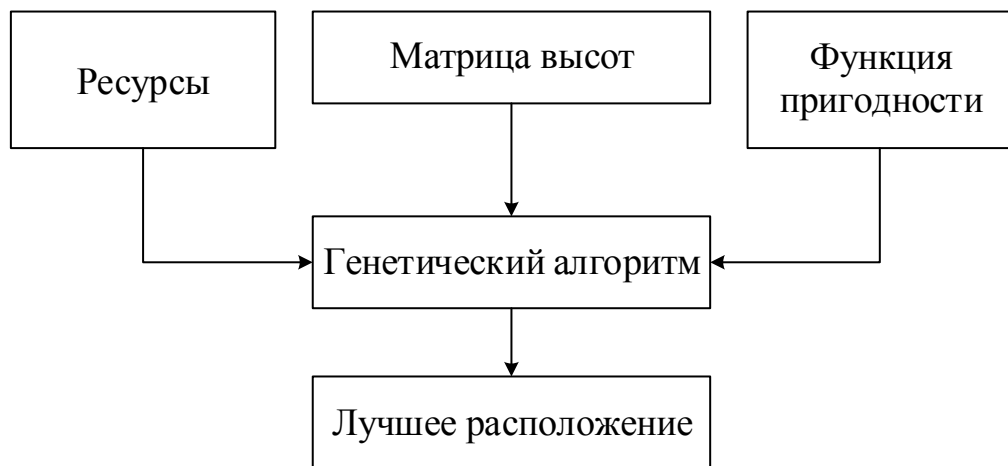


Рисунок 13 – Общая схема получения оптимального решения

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

Во второй главе была детально проработана постановка задачи оптимизации сетей радиосвязи на примере сетей сотовой связи (ССС), определены критерии оптимальности для решения задачи многокритериальной оптимизации. Проведен анализ различных подходов к нахождению оптимальных вариантов построения сети, среди которых прямые методы, метод исследования пространства параметров и использование метаэвристик.

Были получены следующие результаты:

1. Процесс проектирования радиосети был разбит на 3 этапа взаимосвязанных между собой: планирования радиопокрытия, планирование емкости и частотное планирование;

2. Была сформулирована задача синтеза архитектуры сети в терминах векторной (многокритериальной) оптимизации, заключающееся в выборе из нескольких вариантов векторно-сравнимых решений такого, при котором сеть обладает наилучшими значениями вектора показателей качества;

3. Были выделены два подхода к описанию предпочтения ЛПР одного варианта другому: ординалистический и кардиналистический;

4. Был формализован процесс поиска оптимальных вариантов построения ССС и были предложены методы многокритериальной оптимизации, основанные на оптимальности по Парето, для решения проблем краткосрочного и долгосрочного планирования и проектирования телекоммуникационных сетей различных типов, определены критерии оптимальности и показатели качества системы.

5. Впервые предложены и обоснованы методы выбора оптимальных проектных вариантов радиосети с учетом совокупности показателей качества.

6. В качестве метода нахождения оптимального варианта сети были выбраны метаэвристики, а именно эволюционное моделирование и генетические алгоритмы, как наиболее подходящий для автоматизации процесса проектирования и не требующий вмешательства ЛПР на каждом этапе.

3. Математическое моделирование систем сотовой связи

3.1. Определение параметров, используемых при проектировании

На этапе планирования мобильной телекоммуникационной сети необходимо определить, какие параметры будут задаваться заказчиком (исходные данные), а какие – рассчитываться в соответствии с выбранной методикой расчета. Обычно, в качестве исходных данных используются следующие показатели [18, 72, 13]:

- S_0 – площадь зоны обслуживания, км²;
- β – активность одного абонента в час наибольшей нагрузки, Эрл;
- N_a – количество абонентов в проектируемой сети;
- ΔF_c – полоса частот БС, МГц;
- P_b – допустимая вероятность блокировки;
- p_t – процент времени, в течение которого соотношение сигнала/шум на входе приемника МС может быть меньше защитного отношения;
- h_{BS} – высота антенны БС, м;
- G_{BS} – коэффициент усиления антенны (КУА) БС, дБ;
- P_{BS} – мощность передатчика БС, дБ;
- k – затухание радиоволн.

Следующие параметры необходимо рассчитывать в процессе проектирования сети третьего поколения:

- N_k – число частотных каналов;
- n_s – число каналов в секторе;
- A – допустимая нагрузка;
- N_{aBS} – число абонентов, обслуживаемых одной БС;
- N_{BS} – число БС в сети;
- R – радиус соты;
- P_e – вероятность ошибки;

– γ – коэффициент эффективности использования радиоспектра.

Для расчета технических параметров проектируемой сети существуют несколько подходов [30, 88, 111, 107, 106, 95]. В данной работе мы будем использовать методику М.А. Быховского [14, 13], в которой применяются следующие соотношения:

1. Величина допустимой телефонной нагрузки рассчитывается следующим образом:

$$A = n_0 \left(1 - \sqrt{1 - \left(P_b \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right) \text{ для } P_b \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} ; \quad (20)$$

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left(P_b \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \text{ для } P_b > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (21)$$

где n_0 – число абонентов, которые, при заданном качестве сигнала и надежности, могут одновременно работать в одном секторе каждой соты.

2. Число частотных каналов, необходимых для коммуникационной работы сети на заданной территории, определяется выражением

$$N_k = \text{int} \left(\frac{\Delta F}{F_k} \right), \quad (22)$$

где F_k – полоса частот для одного канала, определяемая стандартом радиосвязи.

Размерность кластера проектируемой сети определяется следующим соотношением:

$$p(C) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx \right) \cdot 100, \quad (23)$$

где

$$x_1 = \frac{10 \lg \left(\frac{1}{\beta_e} \right) - \rho_0}{\alpha_\rho},$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right) \exp \left(\frac{\gamma_e^2 (\sigma^2 - \alpha_e^2)}{2} \right),$$

$$\alpha_p^2 = \sigma^2 + \alpha_e^2,$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma_e^2} \ln \left(1 + \left(\exp(\gamma_e^2 \sigma^2) - 1 \right) \frac{\sum_{i=1}^l \beta_i^2}{\left(\sum_i^l \beta_i \right)^2} \right)$$

Значения данного интеграла, являющегося табулированной Q-функцией, приведены в справочной литературе [23, 44, 2].

Параметры l и β_i определяются в зависимости от типа антенны БС (направленные или секторные) следующим образом (M – число секторов, $q = D / R = \sqrt{3C}$):

- если $\varphi = 360^\circ$ и $M = 1$, $l = 6$ и $\beta_1 = \beta_2 = (q - 1)^{-4}$, $\beta_3 = \beta_4 = q^{-4}$, $\beta_5 = \beta_6 = (q + 1)^{-4}$;
- если $\varphi = 120^\circ$ и $M = 3$, $l = 2$ и $\beta_1 = (q + 0.7)^{-4}$, $\beta_2 = q^{-4}$;
- если $\varphi = 60^\circ$ и $M = 6$, $l = 1$ и $\beta_1 = (q + 1)^{-4}$.

Таким образом, после нахождения по таблицам значения x_1 , определяется процент времени срыва связи $p(C)$. Если $p(C) \leq p_t$, то выбранное значение C подходит для заданных условий проектирования, если данное условие не выполняется ($p(C) > p_t$), то расчеты продолжаются с большим значением C .

Для сетей третьего поколения (CDMA) параметр n_0 рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$n_0 = \left(\frac{1 - \lambda}{\alpha \rho_0} \right) \frac{(B_r / B_i)}{2 + \exp(m_0 + K_T \sigma_0)}, \quad (24)$$

где $\lambda = 0.2$ – мощность, затрачиваемая передатчиком БС на пилот-сигнал [96]; $\alpha = 3/8$ – доля пауз в общей длительности разговора [14] B_i – скорость передачи информации, бит/с; σ_0 – уровень флуктуаций; ρ_0 – защитное отношение приемника МС; K_T – допустимый процент времени уменьшения отношения сигнал/шум относительно ρ_0 .

Параметр K_T рассчитывается по следующей формуле [14, 12]:

$$P_T = 100 \int_{K_T}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}} \quad (25)$$

При $p_T = 10\%$, значение коэффициента K_T составит 1,29 [66].

Коэффициент m_0 задается следующим выражением:

$$m_0 = \ln \left(\frac{\xi_1 \exp\left(\frac{\gamma_e^2 \sigma^2}{2}\right)}{\sqrt{(1 - \xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma_e^2 \sigma^2)}} \right) - \frac{3\gamma_e}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sigma, \quad (26)$$

где σ – дисперсия флуктуации сигнала в точке приема ($\sigma = 4-10$ дБ для систем сотовой связи [23, 12]);

$$\gamma_e = 0.1 \ln(10) = 0.23;$$

$$\xi_1 = 3(M + 1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2};$$

$$\xi_2 = \left(3(M + 1)^2 \cdot 2^{-2(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k} \right) \cdot \left(3(M + 1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2} \right);$$

$k = 3-4$ – коэффициент затухания радиоволн.

Для сетей CDMA коэффициент σ_0 , определяющий дисперсию гауссовой случайной величины z_0 , задается следующим образом:

$$\sigma_0 = \sqrt{\ln[(1 - \xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma_e^2 \sigma^2)] + 0,03\sigma^2}. \quad (27)$$

3. Количество абонентов, обслуживаемых одной БС, определяется из следующего соотношения:

$$N_{aBS} = M \operatorname{int} \left(\frac{A}{\beta} \right) \quad (28)$$

Как видно, оно зависит от числа секторов, телефонной нагрузки и активности абонентов.

4. Количество БС, необходимое для работоспособности проектируемой сети, определяется соотношением

$$N_{BS} = \operatorname{int} \left(\frac{N_a}{N_{aBS}} \right), \quad (29)$$

где N_a – запланированное число абонентов, которых сеть должна обслуживать.

5. Предположим, что нагрузка по всей площади зоны распределена равномерно, тогда радиус соты можно определить следующим образом [23, 112]:

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{BS}}} \quad (30)$$

6. Вероятность возникновения ошибок в сеансе связи – один из важнейших показателей эффективности телекоммуникационной сети. Она определяется при $C \geq 3$ по следующей формуле для худшего случая – нахождения МС на границе зоны обслуживания:

$$P_e \approx \frac{1}{(\sqrt{3}C - 1)^{2k}} \quad (31)$$

7. Эффективность использования радиоспектра γ для сетей третьего поколения зависит от числа активных абонентов, приходящихся на полосу частот:

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k} \quad (32)$$

После расчета основных параметров сети, можно переходить к разработке предварительного плана сети сотовой мобильной связи.

Как можно видеть из проведенного анализа, эффективность функционирования системы связи оценивается совокупностью частных показателей надежности N , пропускной способности V и стоимости C (под стоимостью будем понимать эффективность затрат – коэффициент эффективного использования капитальных расходов). Таким образом, обобщенный показатель эффективности системы связи можно записать в виде следующей функции:

$$\Phi = f(C, N, V),$$

где аргументы функции f – условия функционирования проектируемой системы связи и предъявляемые к ней требования, выраженные в виде системы ограничений на частные показатели. Вид функции f определяется целевым назначением системы.

Математически задача повышения эффективности системы связи может быть записана в виде следующей целевой функции:

$$\max[f(C, N, V)],$$

где максимум обобщенного показателя находится среди возможных реализаций системы связи с учетом накладываемой системы ограничений на частные показатели.

3.2. Особенности планирования сетей LTE

Стандарт LTE (Long Term Evolution) стал новым шагом в цепочке стандартов сотовой связи GSM-UMTS-LTE и ориентирован на передачу только пакетного трафика на основе технологий высокоскоростной пакетной передачи данных. Стандарт LTE базируется на технологиях мультиплексирования посредством ортогональных несущих OFDM, применения многоантенных систем MIMO и построения эволюционной системной архитектуры сети (System Architecture Evolution) [6, 127, 136].

По сравнению с ранее разработанными системами 3G, радиointерфейс LTE обеспечивает улучшенные технические характеристики. Так, в новом стандарте полоса частот канала связи может варьироваться от 1,4 до 20 МГц, что позволяет удовлетворить потребности разных операторов связи. При этом оборудование LTE поддерживает более 200 активных соединений в зонах обслуживания БС сети на 5 МГц полосы частот канала связи.

В сетях LTE применяются антенные системы типа MIMO, причем предусматривается использование одной, двух и четырех передающих и приемных антенн в различных сочетаниях. Так же стандарт допускает возможность создания сегмента LTE в существующих диапазонах сетей W-CDMA и GSM [87].

При планировании радиосети LTE целесообразно придерживаться общепринятой временной и логической последовательности действий:

1. Получение исходных данных.

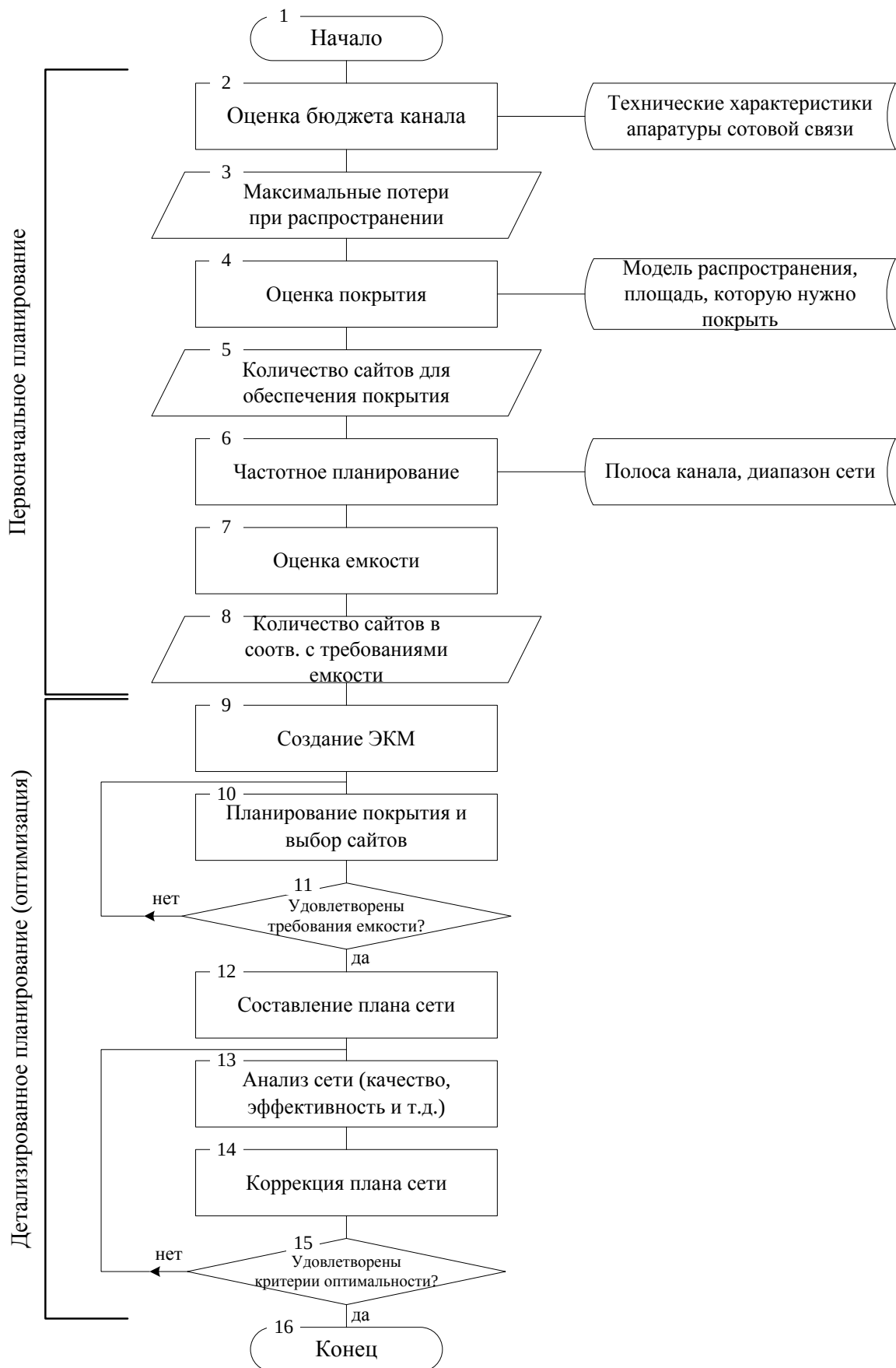
2. Калибровка математической модели распространения радиоволн на основе измерений напряженности поля в наиболее характерных точках зоны обслуживания сети.

3. Построение сети начального приближения.

4. Привязка участков развертывания базовых станций, определенных планом построения (сети начального приближения) к местности.

5. Итеративная оптимизация сети при широком использовании средств программного обеспечения, поддерживающих функции синтеза сети и анализа эксплуатационных характеристик.

В виде блок-схемы данный алгоритм представлен на рис.



Рис

Основная сложность на начальном этапе планирования сетей LTE представляется в формулировке требований к сети начального приближения и поиске баланса между емкостными, скоростными и пространственными показателями сети. За счет возможности использования различных MCS (модуляционно-кодирующих схем с возможностью изменения скорости избыточного кодирования) сеть LTE, на основе измерения отношения сигнал/шум на приемной стороне, может гибко адаптироваться под изменяющиеся условия распространения сигнала. Требуемое отношение с/ш на приеме будет меняться в зависимости от типа используемой модуляции сигнала и скорости избыточного кодирования, т.к. каждая MCS предъявляет свои требования к качеству канала.

В сети LTE вся полоса частот может полностью использоваться каждой сотой независимо от местоположения абонентов в соте. Распределение ресурсных блоков в этом случае осуществляется с использованием специального планировщика [6].

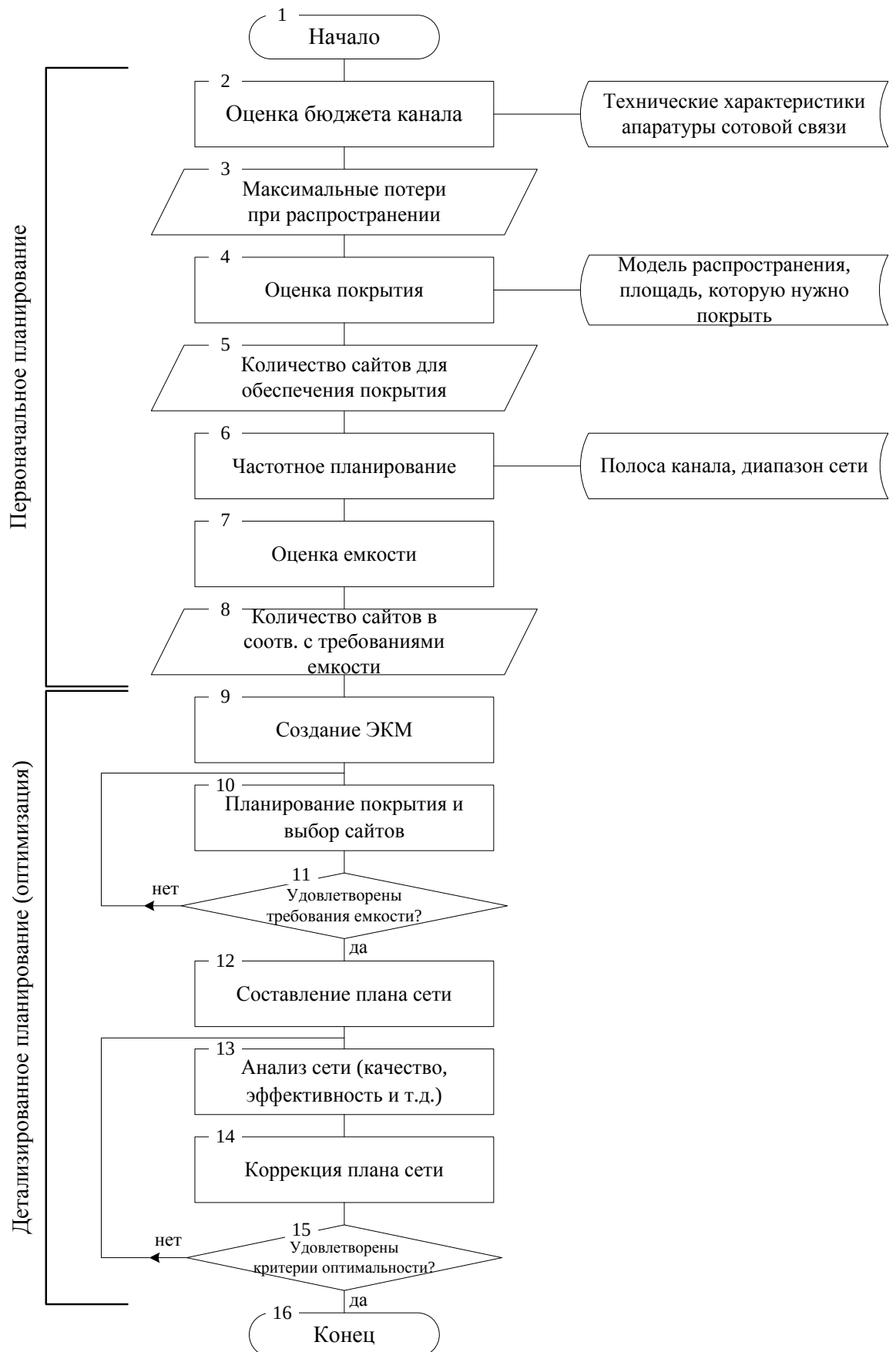


Рисунок 14 – Планирование сети LTE

Различия в процессе планирования сетей трех поколений сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Отличия в планировании сетей

Стандарт	Этапы планирования
GSM	1. Выбор типа частотного кластера 2. Определение пространственных параметров сети 3. Определение параметров базовых станций (исходя из бюджета потерь) 4. Составление частотного плана
WCDMA	1. Определение числа каналов трафика на соту в зависимости от внутрисистемных помех (загрузки сети) 2. Определение пространственных параметров сети 3. Расчет параметров базовых станций (исходя из того, что сигнал групповой; расчет по пилотному сигналу) 4. Распределение кодовых сдвигов по секторам
LTE	1. Определение пространственных параметров сети 2. Частотное планирование 3. Оценка пропускной способности при заданном профиле трафика 4. Уточнение параметров базовых станций и зоны обслуживания, исходя из трафика

Сами этапы и методы планирования также отличаются в различных поколениях сотовой связи (табл. 8)

Таблица 8 – Планирование сетей GSM, WCDMA и LTE

Наименование	GSM	WCDMA	LTE
Планирование частотного ресурса	Распределение частотных каналов между базовыми станциями	Не требуется	Распределение фрагментов полосы системы между пользователями базовых станций
Наличие регулярной методики планирования	Существует	Существует для высокоскоростной и низкоскоростной передачи	Нет
Коммутация	Каналов, пакетов	Каналов, пакетов	Пакетов (все через

			IP)
Передача информации	Узкополосный сигнал	Широкополосный сигнал	OFDM
Профиль трафика	Речь, мобильный интернет, фоновый трафик	Речь, потоковое видео, мобильный интернет, фоновый трафик	VoIP, потоковое видео, мобильный интернет, фоновый трафик
Дисциплина обслуживания	Речь-СМО с отказами, Мобильный интернет-СМО с очередями и приоритетами	Речь-СМО с отказами, Мобильный интернет - СМО с очередями и приоритетами, Потоковое видео-СМО без задержек	VoIP - СМО с отказами, Мобильный интернет - СМО с очередями и приоритетами, Потоковое видео-СМО без задержек

3.3. Модели влияния распространения радиоволн на эффективность системы

3.3.1. Моделирование потерь распространения сигнала

Основными факторами, влияющими на выбор таких параметров сети мобильной связи как тип модуляции, мощность передатчика, структуры приемника и качества покрытия, является модель распространения радиоволн, способ отображения реальных условий распространения в выбранной модели и предположения о структуре радиополя.

В различных сетях условия распространения радиоволн могут варьироваться от простейшей ситуации однолучевого распространения сигнала между приемником и передатчиком в условиях прямой видимости до многолучевого распространения при многократных отражениях от искусственных сооружений и складок местности в условиях доплеровского изменения частоты при движении объекта или препятствий. Так как, радиоканал является статистической системой, в отличие от проводных линий связи, то его свойства могут быть определены только с некоторой вероятностью. И в значительной степени результаты расчета параметров радиоканала зависят от выбранной модели. Модели, основанные на одних и тех же принципах, различаются способом

отображения реальной ситуации. Рекомендации различных национальных и международных организаций связи в значительной степени отличаются друг от друга и, таким образом, не существует единой общепринятой модели расчета распространения сигнала в городских условиях. Из-за того, что измерение параметров модели носит вероятностный характер и требует большого количества измерений и испытаний в различных условиях (погодные условия, времена года, характер застройки, географические параметры местности и т.д.), выбор адекватной модели распространения радиоволн является сложной задачей. Так же для сравнения и оценки качества работы радиосети следует учитывать, что аппаратные компоненты сети, построенные исходя из выбранной модели, могут существенно различаться как функционально, так и по реализованным параметрам. Из этого следует, что различия в качестве функционирования мобильной системы связи всегда могут быть отнесены как к выбранной модели радиоканала, так и к реализованной аппаратуре.

В ходе анализа распространения радиоволн определяется дальность радиосвязи и реальные характеристики принимаемого сигнала. Классический подход к расчету распределения электромагнитного поля в присутствии отражающих и поглощающих объектов заключается в расчете напряженности поля в однородном изотропном пространстве на основе законов отражения, дифракции и рассеяния. Однако специфические условия города, такие как огромное количество фиксированных препятствий сложной формы, перемещение и непостоянство расположения приемников, передатчиков и препятствий, исключают возможность непосредственного применения такой методики и делают невозможным точный расчет распределения радиополя. Точный расчет распределения поля используется только в исключительных, простейших случаях, например, таких как расчет зоны радиотени за большим препятствием для сигнала при точно известном расположении передатчика базовой станции, так как в других случаях возникающий при расчете объем вычислений превосходит все существующие технические возможности. Реальный расчет распределения электромагнитного поля осуществляется на основе двух моделей [134, 135]:

- «большого расстояния» (large scale model);
- «малого расстояния» (little scale model).

Модель «большого расстояния» рассматривает макроэффекты, влияющие на электромагнитное поле, возникающие от препятствий большого по сравнению с длиной волны размера. Согласно этой модели, уравнения для электромагнитного поля в городских условиях отличаются от уравнений свободного пространства, только параметрами распространения, а также некоторой вероятностью отклонения реальных значений распределения радиополя от расчетных. То есть, наличие препятствий оказывает в среднем не сильное влияние на структуру электромагнитного поля, которое остается таким же, как и в свободном пространстве – стационарным, гладким и монотонным. Стационарность подразумевает неизменность структуры поля во времени, гладкость – соответствие малых изменений расстояния малым изменениям напряженности поля, монотонность – непрерывное убывание величины поля с увеличением расстояния от приемника до передатчика.

Использование экспериментально измеренных параметров модели обеспечивает наибольшую точность расчетов для конкретного региона.

Для приближенных аналитических расчетов вероятностной дальности радиосвязи используются методики на основе рекомендаций EUROCAST (Европейского объединения для научных и технических исследований) и рекомендаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ) [5, 1].

В основе этих методик лежат результаты статистической обработки большого количества экспериментальных данных описывающих параметры модели для различных типовых ситуаций (земная или водная подстилающая поверхность, пригород, большой город и т. д.).

Большинство общепринятых методик расчета дальности радиосвязи были разработаны для транкинговых сетей связи. Такие сети отличаются относительно большой дистанцией связи (десятки километров) и большой высотой передающих

антенн (устанавливаются на высотные дома и вышки). В таких условиях распространения можно рассматривать «средние» значения мощности.

При расчете дальности связи в небольших сотах применение данных методик возможно только с оговорками, так как на расстоянии в сотни метров и при расчете затуханий внутри зданий практически невозможно говорить о «средней» равномерности поля.

Более того, любой расчет дальности радиосвязи при использовании любых методик может быть только оценочным, и его достоверность определяется тем, насколько «средние» условия распространения совпадают с реальными, а также зависит от правильности выбора введенных в модель поправочных коэффициентов, зависящих от условий конкретного региона.

Классификация моделей распространения радиосигнала представлена на рис. 15.

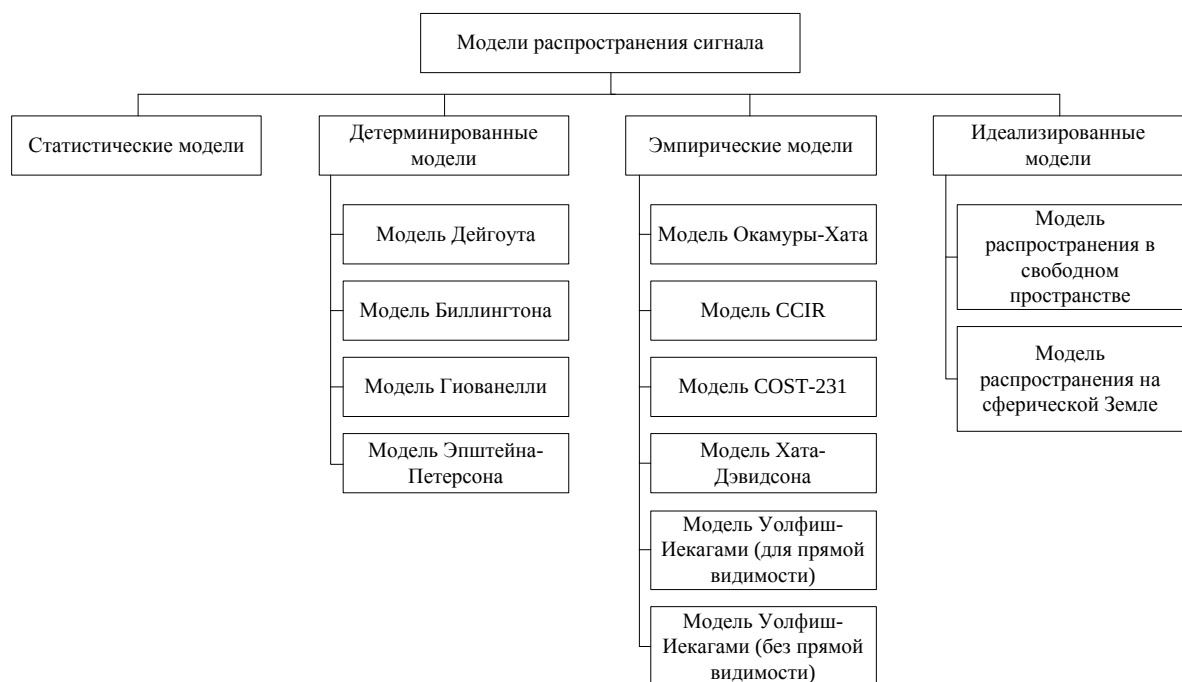


Рисунок 15 – Классификация типовых моделей распространения

Для аналитических расчетов дальности радиосвязи в системах с аналоговыми сигналами Международной Консультативной Комиссии Радиосвязи (МККР) разработана «Методика определения ожидаемой дальности УКВ радиосвязи с подвижными объектами», составленная на основе документов

МККР «Рекомендация 370» и «Отчет 239». Данная методика основывается на следующих положениях [33, 122]:

- величина зоны обслуживания системы связи рассчитывают, исходя из минимальной величины сигнал/шум на выходе приемника, при которой достигается требуемая разборчивость речи. Для систем с цифровыми сигналами общепринято, что понятие «разборчивость речи» заменяется на «достоверность приема». В «Методике» и «Рекомендации» эти понятия не определены;

- расчеты, проводимые по «Методике» и «Рекомендации», имеют вероятностный характер. Это обусловлено тем, что путем точных математических вычислений могут быть получены только отдельные параметры, характеризующие дальность радиосвязи. Большое количество поправочных коэффициентов, используемых в расчетах, выбираются на основе из среднестатистических многолетних наблюдений. Полнота этих данных и возможность их применения в каждом конкретном случае остается нерешенной проблемой;

- основу «Методики» составляют кривые распространения радиоволн. Данные кривые отражают зависимость средней напряженности электромагнитного поля E (децибелы относительно 1 мкВ/м при 1 кВт эффективной излучаемой мощности и высоте передающей антенны 10 м) в точке расположения приемника при различных расстояниях d до передатчика и значениях высоты подъема антенны приемника h . Графики соответствуют 50% вероятности установления радиосвязи на 50% территории и построены для различных частот и типов подстилающих поверхностей.

На основе серии проведенных в США измерений, Ли (англ. W.C.Y. Lee) предложил довольно простую модель распространения сигнала с несущей частотой $f_c = 900$ МГц. Среднее значение мощности, измеренной на расстоянии d от передающей станции, согласно модели Ли, можно описать с помощью следующего выражения [30, 109][12]:

$$P(d) = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\gamma} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-n} F_0, \quad (33)$$

или в логарифмическом представлении

$$\begin{aligned} (P(d))_{dB} &= (P_0)_{dB} - \gamma \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) - n \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) (F_0)_{dB}, \\ F_0 &= \prod_{i=1}^5 F_i, \end{aligned} \quad (34)$$

где P_0 – эталонная медианная мощность, измеренная на расстоянии $d_0 = 1$ км; F_0 – поправочный коэффициент, определяющийся с помощью серии компонентных множителей.

Коэффициенты F_i рассчитываются следующим способом:

$$\begin{aligned} F_1 &= \left(\frac{h_{BS,eff}}{30,48} \right)^2; \\ F_2 &= \left(\frac{h_{MS}}{3} \right)^v; \\ F_3 &= \frac{P_T}{10}; \\ F_4 &= \frac{G_T}{4}; \\ F_5 &= G_R, \end{aligned} \quad (35)$$

где $h_{BS,eff}$ – эффективная высота антенны базовой станции, м; v – показатель степени ($v=1$ при высоте антенны подвижной станции менее 3 м, при высоте более 10 м – $v=2$) P_T – мощность сигнала передатчика базовой станции, Вт; G_T, G_R – коэффициенты усиления антенн соответственно базовой и мобильной станции относительно полуволнового вибратора.

Параметры P_0 и γ были получены экспериментально в результате проведения замеров в различных типах окружающей среды и представлены в таблице 9 [108].

Таблица 9 – Значения P_0 и γ для различных типов окружающей среды

Тип среды	P_0	γ , дБ на декаду
Свободное пространство	-41	20,0
Сельская местность, редкая застройка	-40	43,5
Пригород, небольшой город	-54	38,4
Филадельфия	-62,5	36,8
Нью-Йорк	-55	43,1
Токио	-78	30,5

Система, в которой были проведены измерения, послужившие основой эмпирических формул модели Ли, обладает следующими параметрами [108]:

- несущая частота $f_c = 900$ МГц;
- высота антенны базовой станции $h_{BS,eff} = 30$ м;
- мощность передаваемого сигнала $P_T = 10$ Вт ;
- коэффициент усиления антенны базовой станции относительно полуволнового вибратора $G_T = 6$ дБ;
- высота антенны мобильной станции $h_{MS} = 3$ м;
- коэффициент усиления антенны мобильной станции $G_R = 0$ дБ.

Эти параметры отражены в формулах в виде коэффициентов $F_1 \dots F_5$.

Другой распространенной моделью для прогнозирования сигнала в городских условиях является модель Окамуры (англ. Okumura). В ее основе также лежит множество измерений. Эти измерения проводились в Токио в частотном диапазоне от 150 до 1920 МГц. В результате, для описания зависимости медианных потерь $(L_{50})_{dB}$ от расстояния d до передающей антенны базовой станции была предложена следующая формула [94, 129]:

$$(L_{50})_{dB} = L_S + A(f, d) + G(h_{BS, eff}) + G(h_{MS});$$

$$L_S = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (36)$$

где L_S – потери при распространении в свободном пространстве; $A(f, d)$ – медианное значение потерь в городской среде с квазигладкой земной поверхностью по отношению к затуханию в свободном пространстве в случае, если эффективная высота антенны базовой станции $h_{BS, eff} = 200$ м, а высота антенны подвижной станции $h_{MS} = 3$ м; $G(h_{BS, eff})$ – корректирующий коэффициент (в дБ), учитывающий отличие эффективной высоты антенны базовой станции от 200 м; $G(h_{MS})$ – корректирующий коэффициент (в дБ), зависящий от высоты антенны мобильной станции, если она отличается от 3 м.

Потери при распространении в свободном пространстве L_S вычисляются в логарифмическом масштабе.

Таким образом, с помощью формулы (36) и полученных эмпирических графиков, можно оценить затухание сигнала в условиях городской застройки на частотах от 150 до 2000 МГц, если расстояние между мобильной и базовой станциями составляет от 1 до 100 км, а эффективная высота антенны базовой станции лежит в диапазоне от 30 до 1000 м [129].

Модель Окамуры довольно проста. Характеристики городской местности в Европе или США немного отличаются от параметров японской городской местности, но, несмотря на это, модель Окамуры пользуется популярностью и считается одной из наилучших для разработки систем наземной подвижной связи. Основным недостатком данной модели является медленная реакция на изменение типа местности. Лучше всего модель Окамуры подходит для городских и пригородных районов и не столь эффективна для проектирования систем в сельской местности.

При адаптации эмпирических формул к графикам, составленным Окамурай, возникла модель Хата (англ. Hata). Эти формулы хорошо аппроксимируют графики в определенных диапазонах несущих частот на квазигладкой земной поверхности. Для оценки затухания в городской местности в частотном диапазоне от 150 до 1500 МГц при эффективной высоте антенны базовой станции $h_{BS,eff}$ от 30 до 200 м были предложены следующие эмпирические формулы [120]:

$$\begin{aligned} (L_{50})_{dB} \Big|_{город} &= 69,55 + 26,16 \cdot \lg f - 13,83 \cdot \lg(h_{BS,eff}) - \\ &- a(h_{MS}) + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{BS,eff})) \cdot \lg d; \\ a(h_{MS}) &= (1,1 \cdot \lg f - 0,7) h_{MS} - 1,56 \cdot \lg f + 0,8, \end{aligned} \quad (37)$$

где $a(h_{MS})$ – поправочный коэффициент, который от высоты антенны мобильной станции и изменяющийся в диапазоне высот от 1 до 10 м.

Для крупного города он задается выражениями (в дБ):

$$a(h_{MS}) = 8,29(\lg 1,54 h_{MS})^2 - 1,1 \text{ для } f < 400 \text{ МГц},$$

$$a(h_{MS}) = 3,2(\lg 11,75 h_{MS})^2 - 4,97 \text{ для } f > 400 \text{ МГц}.$$

Для пригородной местности потери при распространении сигнала описывается следующей формулой:

$$(L_{50})_{dB} = (L_{50})_{dB} \Big|_{город} - 2 \left(\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \quad (38)$$

В условиях открытой местности потери описываются выражением

$$(L_{50})_{dB} = (L_{50})_{dB} \Big|_{город} - 4,78(\lg f)^2 + 18,33 \cdot \lg f - 40,94 \quad (39)$$

Таким образом, описанные выше модели дают возможность оценить зависимость потерь при распространении сигнала от несущей частоты, высоты антенн базовой и мобильной станций, а также типа местности. Данные модели с допустимой точностью отражают процессы распространения сигнала на расстояния свыше 1 км, и лучше всего подходят для частот до 1,5 ГГц. Однако существуют системы персональной связи, работающие в диапазоне от 1,8 до 2,0 ГГц, например, DCS 1800 и PCS 1900, являющиеся версиями системы GSM и распространенные в Европе и США соответственно. Для создания моделей

распространения сигнала в системах PCS, было проведено множество измерений и поставлены многочисленные эксперименты. Диапазон 1,8 ГГц отличается от традиционного для сотовой телефонии диапазона 900 МГц большим затуханием, в связи с этим основным отличием систем PCS от обычных ССС является уменьшенный размер сот. Исследования новых моделей распространения проводились в рамках проекта Европейского Союза COST-231. В результате проектов COST были разработаны и представлены в справочной литературе, по крайней мере, две модели распространения [97]:

- модель COST231-Хата;
- модель COST231-Уолфиш-Икегами.

3.3.2. Модель учета влияния рельефа местности на зону покрытия одиночного источника и системы в целом

В процессе поиска оптимального решения задачи территориального планирования, необходимо рассчитывать область покрытия от всех размещенных ресурсов. Таким образом, принимая во внимание использование генетических алгоритмов для поиска решения и ГИС технологий для получения информации о местности, необходимо выработать линейный алгоритм, позволяющий рассчитать покрытие от отдельного ресурса.

Основной метод поиска предполагает, что генетический алгоритм циклично размещает ресурсы на заданной территории. Каждый размещенный ресурс характеризуется своим радиусом области покрытия. Для оценки эффективности покрытия территории каждым ресурсом применяется алгоритм, использующий карту высот заданной местности [75, 80].

На рисунке 16 показана схема расчета различных параметров.

В процессе работы алгоритма используются следующие значения:

1. j - место расположения ресурса
2. $j + 1$ – ячейка поблизости от места расположения станции
3. $h(j + 1)$ – высота в ячейке $j + 1$

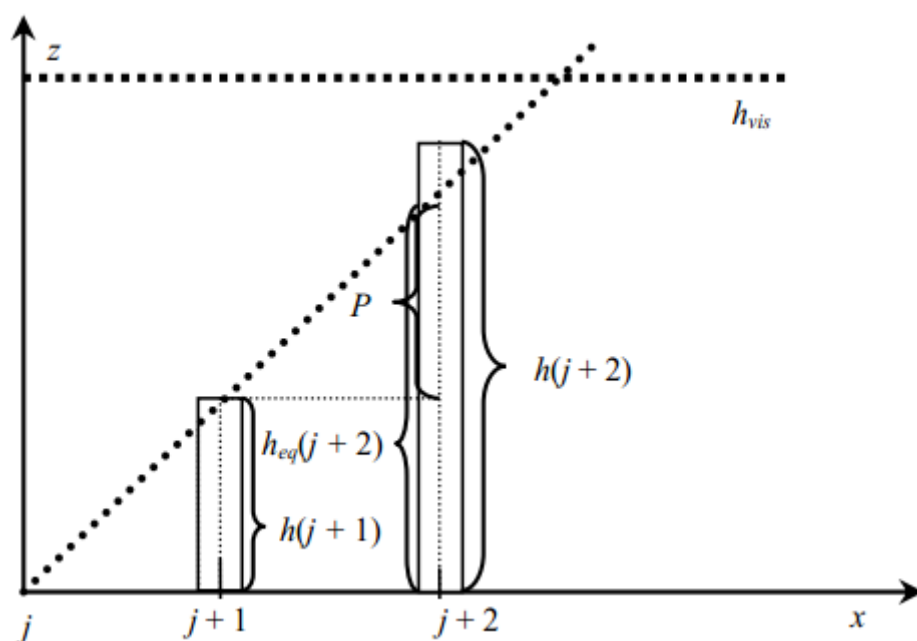


Рисунок 16 – Схема расчета параметров прямой видимости

4. $h_{eq}(j+2)$ – эквивалентная высота в ячейке $j+2$

5. P – разница между $h_{eq}(j+2)$ и $h(j+1)$

6. $h(j+2)$ – высота в ячейке $j+2$

7. h_{vis} – уровень видимости

Начиная с точки расположения ресурса, для всех ячеек рассчитывается эквивалентная высота по формуле, полученной из отношения треугольников:

$$[(j+1)-j]:h(j+1)=[(j+2)-(j+1)]:P \quad (40)$$

Выразим P :

$$P = \frac{h(j+1)[(j+2)-(j+1)]}{(j+1)-j} = h(j+1) \quad (41)$$

Из рисунка 1 и формулы (41) имеем:

$$h_{eq}(j+2) = h(j+1) + P = 2h(j+1) \quad (42)$$

Полученное значение используется для проверки видимости ячеек.

Начальными условиями данного алгоритма являются следующие:

- высота уровня видимости выше максимальной высоты ячеек
- изгибы земли не влияют на вычисления
- диаграмма направленности, для упрощения дальнейших расчетов, характеризуется окружностью с фиксированным радиусом, так же возможна замена на алгоритм с другой диаграммой направленности антенны, но при этом существенно увеличится время расчетов.

Вычисление эффективной области покрытия ресурса проводится в соответствии с выбранным направлением. На рисунке 17 показана схема работы алгоритма оценки видимости ячеек для каждого направления.

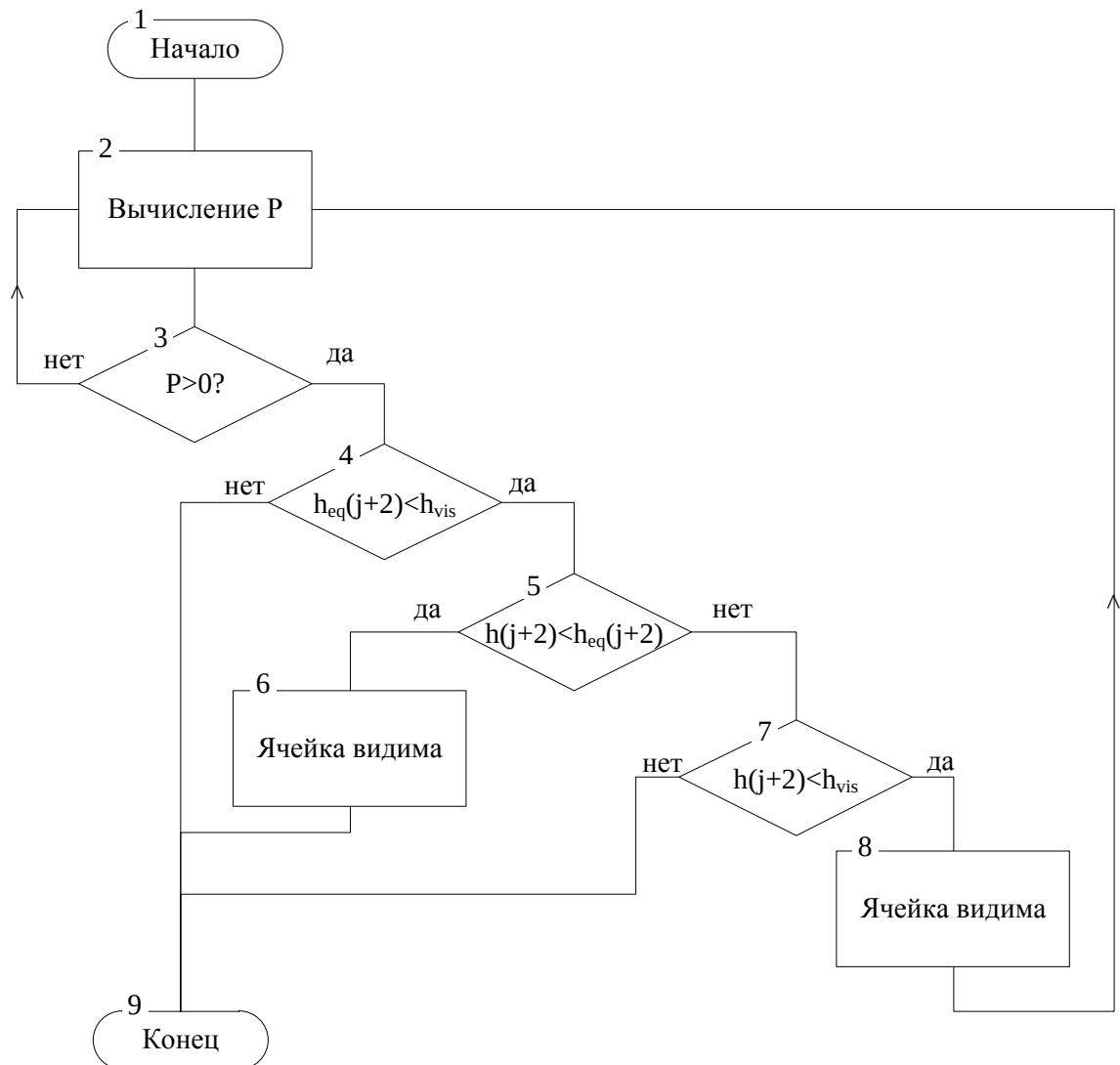


Рисунок 17 – Алгоритм оценки видимости ячеек

Шаги алгоритма:

1. Вычисляется первое значение P между ячейкой расположения ресурса и последующей. Если P меньше нуля, то это означает, что последующая ячейка имеет высоту меньше, чем ячейка расположения ресурса и, следовательно, видима на высоте h_{vis} . Значения P вычисляются для всей площади покрытия. Если встречается $P > 0$, то осуществляется переход к следующему шагу.

2. Сравнивается эквивалентная высота с уровнем видимости, если расчетное значение меньше, то вычисления по данному лучу заканчиваются, в противном случае осуществляется переход на шаг 3.

3. Сравнивается эквивалентная высота и высота ячейки. Если первая больше, то ячейка видима и вычисления по данному лучу заканчиваются. В

противном случае высота ячейки сравнивается с уровнем видимости и, если высота меньше, то значение P меняется на текущее значение и ячейка объявляется видимой. Алгоритм возвращается к шагу 1.

Эти 3 шага применяются ко всей области покрытия вдоль направлений, выбор которых описан ниже. Таким образом, необходимо в цикле применить все шаги к каждому лучу, выходящему из места расположения ресурса с заданным углом. Также необходимо проверить ячейки, находящиеся между соседними лучами.

На рисунке 18 представлена схема обработки сетки с фиксированным шагом ячейки и углом радиуса.

Для анализа нерассмотренных ячеек используется приближенный алгоритм, позволяющий, однако, определить, видима ячейка или нет. Алгоритм основан на запоминании видимых ячеек на просмотренных лучах, после запоминания позиций двух смежных лучей, ячейки между ними объявляются видимыми.

Для упрощения расчетов в начальных популяциях используется большой шаг между смежными лучами, затем это значение уменьшается для получения более точных результатов.

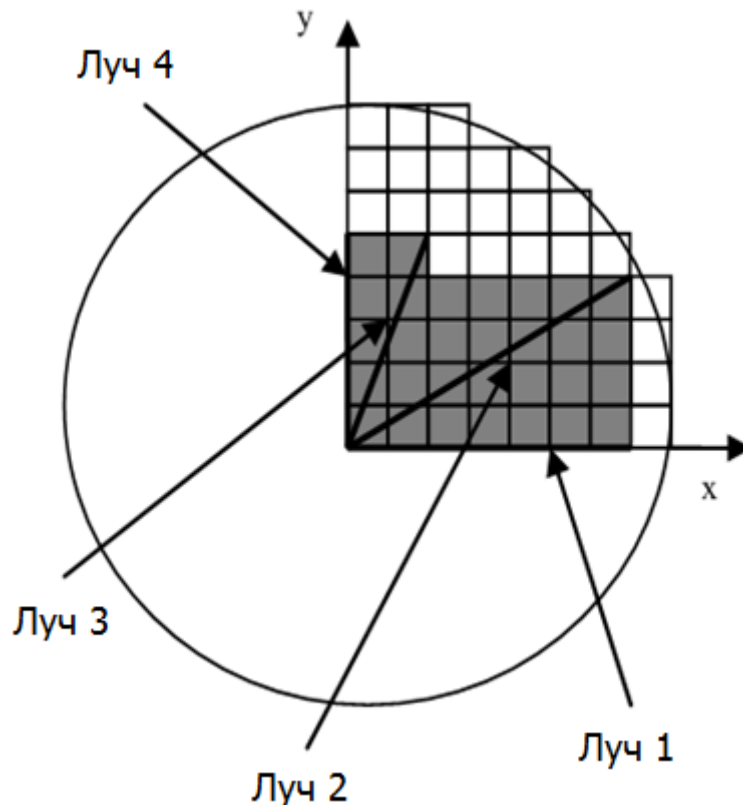


Рисунок 18 – Схема обработки ячеек

3.4. Моделирование зоны покрытия

Зона радиопокрытия БС зависит от ряда факторов. Среди них можно выделить параметры приемника БС, рельеф местности, плотность городской застройки, характеристики излучения мобильных станций и т.д. Основой при расчете зоны покрытия территории радиосигналом является процедура определения напряженности электромагнитного поля в месте установки БС. Однако, абсолютно точной физической модели распространения радиоволн не предоставляют даже самые сложные, комплексные методики. Таким образом, невозможность учета всех влияющих факторов позволяет говорить лишь об оценке зоны радиопокрытия сигнала БС.

Алгоритм построения зон обслуживания БС можно представить в следующем виде (рис. 19) [72]:

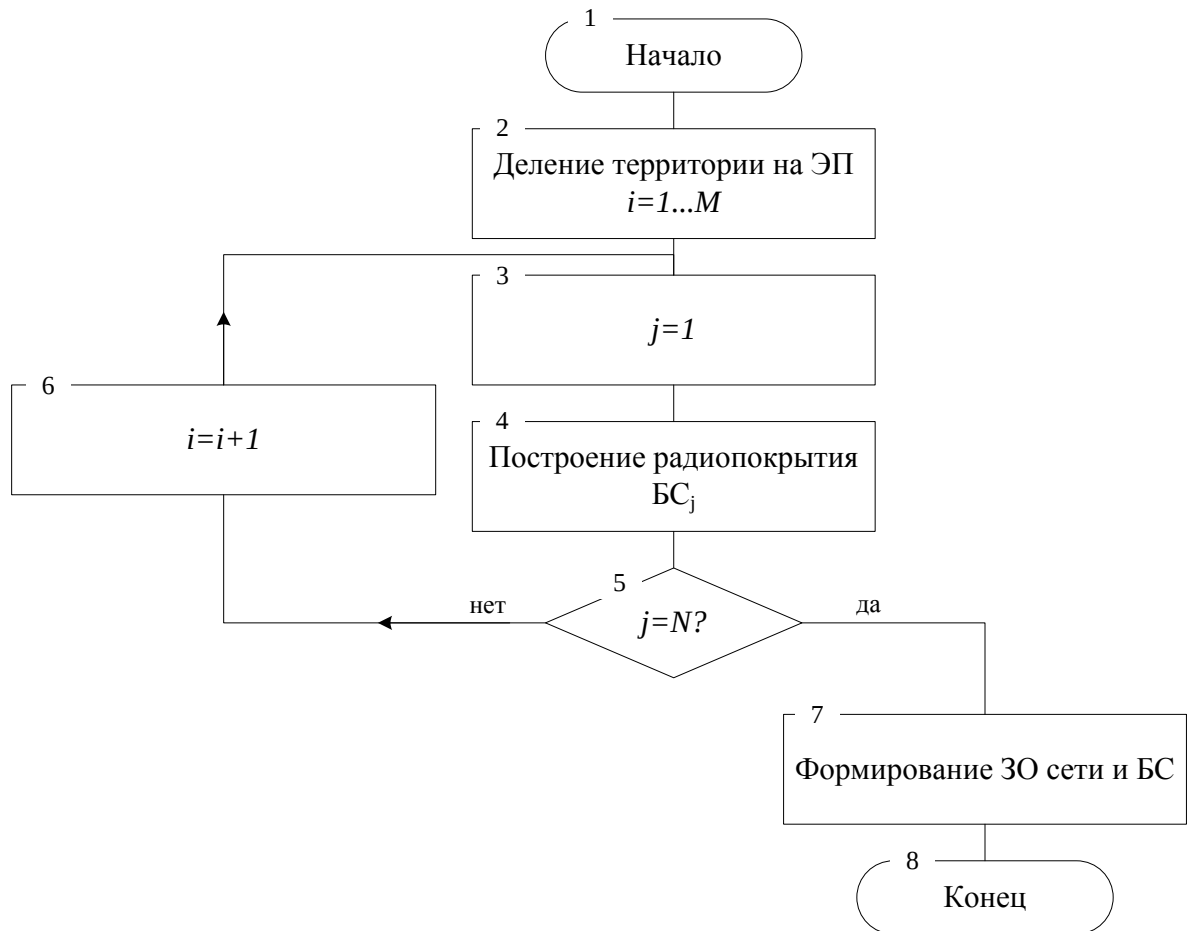


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритма построения зон обслуживания

В результате построения радиопокрытия каждой базовой станции и соответствующих абонентских (мобильных) станций образуется множество зон покрытия, состоящих из элементарных площадок, изображаемых в виде квадратов с центром в точке с координатами $(Ш_i, Д_i)$ и имеющих следующий набор атрибутов [3]:

- порядковый номер, ID_i^j ;
- уровень сигнала на входе приемника МС, создаваемый передатчиком БС, P_{BSi}^j , дБВт;
- уровень сигнала на входе приемника БС, создаваемый передатчиком МС, P_{MSi}^j , дБВт;
- ослабление сигнала на трассе БС-МС, L_i^j , дБ;
- длина трассы, D_i^j , км;

- азимут направления БС – МС, az_{12i}^j , град;
- азимут направления МС – БС, az_{21i}^j , град;
- коэффициент усиления антенны БС, G_{BSi}^j , дБ;
- коэффициент усиления антенны МС, G_{MSi}^j , дБ;

Перечисленные параметры рассчитываются для каждого i -го фрагмента территории и j -ой БС следующим образом (рис. 20) [72]:

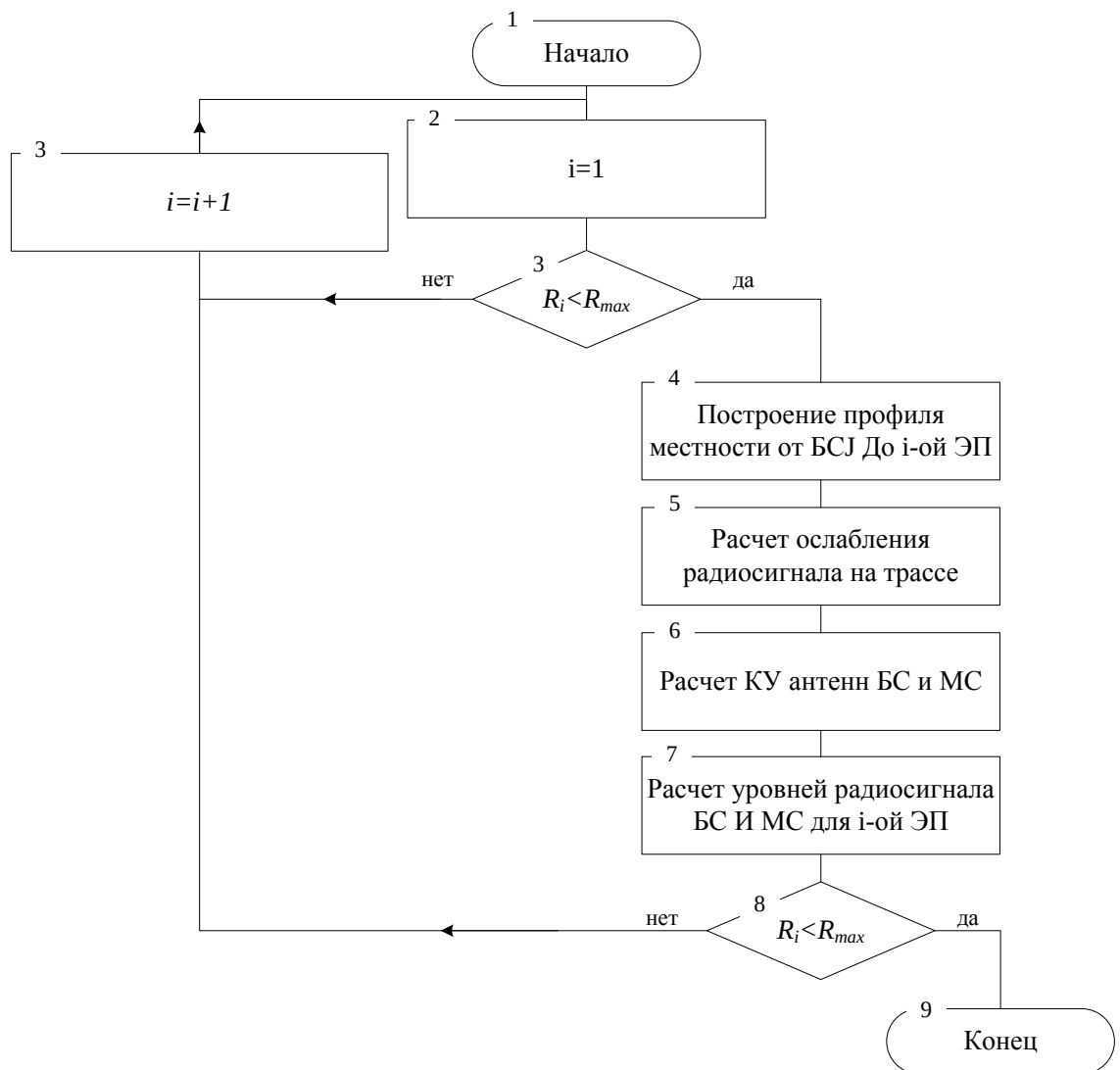


Рисунок 20 – Блок-схема алгоритма построения радиопокрытия БС

1. С помощью значений координат рассчитывается расстояние r_i между БС и ЭП, если оно превышает $R_{\max}$, то осуществляется переход к следующей ЭП. $R_{\max}$ рассчитывается следующим образом:

$$R_{\max} = 0,05 \cdot 10^{\min(Z_1, Z_2)}$$

$$\text{где } Z_1 = P_{\text{prdBS}} - P_{\text{prmMS}} + G_{\text{maxBS}} - L_{\text{prdBS}} + G_{\text{maxMS}} - L_{\text{prmMS}} - 32,45 - 20\lg(f_{\text{prd}}),$$

$$Z_2 = P_{\text{prdMS}} - P_{\text{prmBS}} + G_{\text{maxMS}} - L_{\text{prdMS}} + G_{\text{maxBS}} - L_{\text{prmBS}} - 32,45 - 20\lg(f_{\text{prm}}),$$

L_{prdMS} – потери в антенно-фидерном тракте передатчика МС, дБ,

L_{prmMS} – потери в антенно-фидерном тракте приемника МС, дБ,

L_{prdBS} – потери в антенно-фидерном тракте передатчика БС, дБ,

L_{prmBS} – потери в антенно-фидерном тракте приемника БС, дБ.

2. Строится профиль трассы, с помощью которого определяется длина трассы $Dist_i^j$ и высоты антенн h_{BS} и h_{MS} над уровнем моря.
3. По алгоритму, описанному в рекомендации МСЭ Р.1546, определяется ослабление радиосигнал на трассе L_i^j [122, 117].
4. Рассчитывается коэффициент усиления антенн, для этого:

- 4.1. Для антенны БС рассчитывают угловое отклонение от оси основного лепестка в горизонтальной плоскости:

$$\varphi = \begin{cases} az_{12i}^j - az_{\text{BS}} & -180 \leq az_{12i}^j - az_{\text{BS}} \leq 180 \\ |az_{12i}^j - az_{\text{BS}}| - 360 & az_{12i}^j - az_{\text{BS}} > 180 \\ 360 - |az_{12i}^j - az_{\text{BS}}| & az_{12i}^j - az_{\text{BS}} < -180 \end{cases}$$

- 4.2. Далее, рассчитывается угловое отклонение от оси основного лепестка передающей антенны БС в вертикальной плоскости:

$$\alpha = \Delta_{\text{BS}} - \delta, \text{ град},$$

где

$$\delta = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \cdot \frac{(h_{\text{BS}} - h_{\text{MS}})}{Dist_i^j}, \text{ если } Dist_i^j < 130,4(\sqrt{h_{\text{BS}}} + \sqrt{h_{\text{MS}}}) \\ 0, \text{ если } Dist_i^j \geq 130,4(\sqrt{h_{\text{BS}}} + \sqrt{h_{\text{MS}}}) \end{cases}, \text{ град},$$

Δ_{BS} – угол возвышения антенны, град.

4.3. Рассчитываются коэффициенты усиления $G_H(\varphi), G_V(\alpha)$ с помощью парциальных диаграмм направленности.

4.4. Рассчитывается коэффициент усиления антенны БС:

$$G_{BSi}^j = G_{\max BS} + G_H(\varphi) + G_V(\alpha)$$

4.5. Аналогично, рассчитывается коэффициент усиления для МС G_{MSi}^j

4.6. Рассчитываются уровни сигнала на входах приемников МС, создаваемые передатчиками БС и уровни сигналов на входах приемников БС, создаваемые передатчиками МС:

$$P_{MSi}^j = P_{prdB} + G_{BSi}^j - L_{prdB} + G_{MSi}^j - L_{prMS} - L_i^j$$

$$P_{BSi}^j = P_{prdMS} + G_{MSi}^j - L_{prdMS} + G_{BSi}^j - L_{prBS} - L_i^j$$

Таким образом, зона обслуживания каждой БС формируется по результатам анализа всей совокупности элементов множеств зон покрытия, в виде множества зон обслуживания. Зона обслуживания сети состоит из зон обслуживания всех БС, то есть является совокупностью всех множеств $3O^j$.

3.5. Выбор оптимального проектного варианта сети сотовой связи

В результате работы многокритериального генетического алгоритма был получен набор оптимальных по Парето решений. Для решения задачи проектирования радиосети, необходимо выбрать единственный вариант сети. Для этого необходимо привлечение дополнительной информации от лица принимающего решения. Одним из методов выбора решения среди альтернатив является метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати [15, 63, 62].

Таким образом, схему поиска оптимального решения можно представить в следующем виде (рис. 21) [68, 69]:

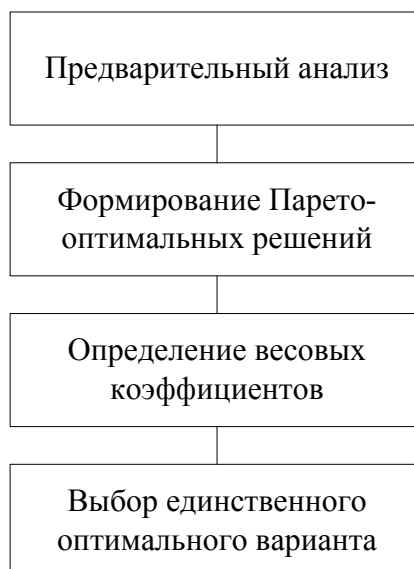


Рисунок 21 – Схема поиска решения

На первом этапе происходит определение критериев, участвующих в оптимизации и условий оптимизации (территория и начальные параметры). На втором этапе с помощью генетического алгоритма формируется набор оптимальных по Парето вариантов построения сети [79, 74]. На третьем шаге ЛПР определяет важность параметров сети, в зависимости от конечной цели оптимизации (например, обеспечение максимальной территории покрытия, емкости или минимизация стоимости). Из полученных критериев формируется иерархическая структура, подходящая для использования МАИ. На основе коэффициентов, полученных с помощью МАИ, выбирается оптимальный план [77, 71].

Метод анализа иерархий – системная процедура анализа и представления проблемы в виде иерархии.

МАИ основывается на следующих трех принципах: декомпозиция, сравнение альтернатив и синтез приоритетов [64]. Анализ начинается с преобразования сложной, многокритериальной проблемы в иерархию, каждый уровень которой состоит из нескольких простых элементов, которые, в свою очередь, также разбиваются на подэлементы. На втором шаге для каждого уровня иерархии с помощью метода попарных сравнений вычисляются приоритеты элементов. Третьим шагом МАИ синтезирует приоритеты элементов в общие

приоритеты альтернативных вариантов решения поставленной задачи. МАИ отличается от других общепринятых методов поддержки принятия решений тем, что не требует от ЛПР указывать точные числовые эквиваленты приоритетов для каждого элемента, а позволяет делать это в вербальном режиме с помощью таблицы приоритетов [64].

Согласно принципам МАИ, на первом этапе происходит выбор критериев, от которых зависит выбор той или иной альтернативы. Далее, выбранные критерии структурируются в виде иерархии, чтобы показать их взаимодействие между собой и влияние друг на друга.

Представления заказчика о требованиях к проектируемой сети определяют основные направления оптимизации, включаемые в анализ: надежность сети, ее пропускная способность и стоимость. Для обеспечения достаточного уровня детализации, критерии надежности и пропускной способности разбиваются на подкритерии. В надежности можно выделить следующие аспекты: число срывов, допустимая вероятность блокировки вызова, допустимая телефонная нагрузка, эффективность использования радиочастотного спектра. На пропускную способность сети влияют следующие параметры: число абонентов, площадь территории обслуживания, количество выделенных частотных каналов, активность абонентов в час наибольшей нагрузки. Стоимость, в общем случае, зависит от количества БС. Иерархия для МАИ представлена на рисунке 22 [80]:

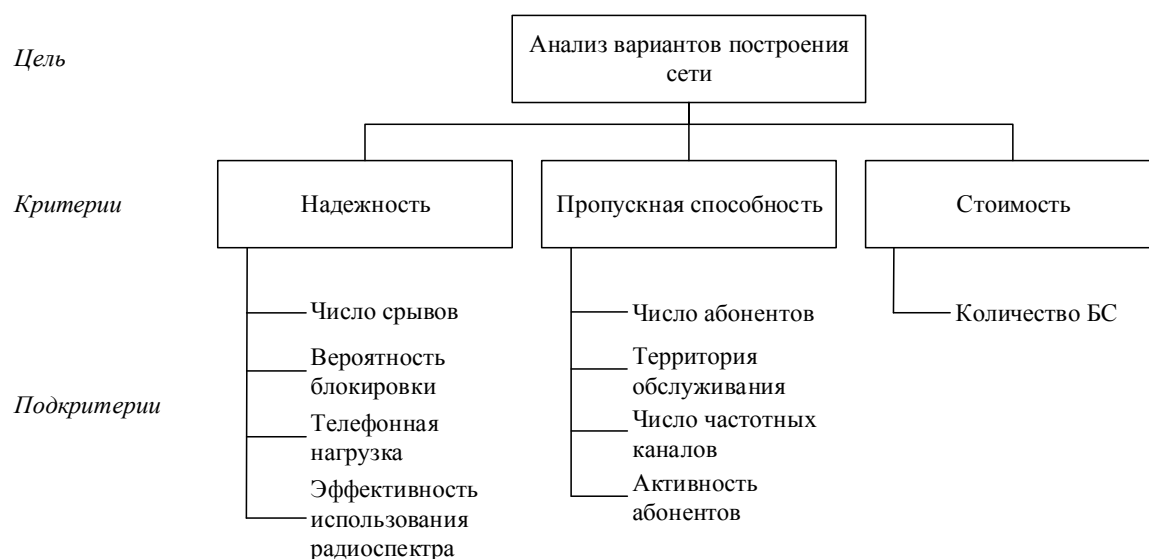


Рисунок 22 – МАИ-иерархия для анализа вариантов построения сети

Вторым шагом МАИ является определение приоритетов для каждого элемента иерархии. Приоритеты выставляются путем попарного сравнения каждого набора элементов с учетом элементов, находящихся выше по иерархии. Для выставления приоритетов Т. Саати была разработана специальная шкала [64]:

Таблица 10 – Шкала относительной важности

Степень важности	Определение	Пояснение
1	Одинаковая значимость	Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Некоторое преобладание значимости одного действия перед другим (слабая значимость)	Существуют соображения в пользу предпочтения одного из объектов, однако эти соображения недостаточно убедительны
5	Существенная или сильная значимость	Имеются надежные данные и логические соображения для того, чтобы показать предпочтительность одного из объектов
7	Очевидная значимость	Убедительное свидетельство в пользу предпочтения одного объекта другому
9	Абсолютная значимость	Свидетельство в пользу предпочтения одного объекта перед другой в высшей степени убедительны
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между двумя суждениями	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение
Обратные величины приведенных чисел	Если элементу i при сравнении с элементом j приписывается одно из приведенных выше чисел то элементу j ; при сравнении с i приписывается обратное значение.	

При групповой оценке приоритетов существует несколько вариантов учета мнений и взглядов каждого эксперта. Есть четыре пути выставления групповых приоритетов при наличии согласованных целей:

- соглашение;
- голосование или компромисс;
- геометрическое среднее индивидуальных оценок;

– изолированные модели или эксперты [99].

Предпочтительный метод в таких случаях – это достижение соглашения между всеми экспертами, однако, если оно не может быть достигнуто, то обычно используется усредненное значение оценок. Пример полученных приоритетов критериев представлен на рисунке 23.



Рисунок 23 – Приоритеты критериев

В классическом подходе к выставлению весов и приоритетов, оценки являются целыми числами от 1 для «неудовлетворительно» и 5 для «выдающегося». Таким образом, при применении данной шкалы оценок может сложиться некорректное предположение, что «выдающееся» должно быть в 5 раз лучше «неудовлетворительного». В МАИ эта проблема решена путем присвоения значения важности или полезности для каждого критерия с помощью попарного сравнения.

Анализ альтернативных вариантов осуществляется путем определения оценки и соответствующего значения полезности для каждой возможной радиосети учитывая значения всех ее критериев.

Следующим этапом будет окончательный выбор проекта радиосети с помощью методик целочисленного программирования – максимизации общих предпочтений заказчика. Таким образом, выбор оптимального решения

происходит с использованием приоритетов заказчика, полученных в результате применения МАИ вместо обычных методов – минимизации, например, общей стоимости или максимизации пропускной способности. Максимизация предпочтений подразумевает получение в результате наиболее подходящего проекта для каждого заказчика и его требований. Результирующий показатель качества системы может быть представлен в виде скалярной целевой функции:

$$F(k_1, k_2, \dots, k_m) = \sum_{j=1}^m c_j f_j(k_j), \quad (43)$$

где c_j – шкалирующие коэффициенты, полученные в результате МАИ, $f_j(k_j)$ – скалярные функции полезности, отражающие полезность полученного варианта сети по показателю k_j .

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

В третьей главе было проведено математическое моделирование систем сотовой связи. Определены параметры, используемые при проектировании, составлена методология учета потерь при распространении сигнала с использованием моделей МСЭ.

Были разработаны методики построения зон обслуживания и радиопокрытия БС в соответствии с рекомендациями МСЭ, а также модель определения зоны «прямой видимости».

Также была предложена методология получения оптимального проектного решения, основывающаяся на применении методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, заключающаяся в следующем: в результате работы многокритериального генетического алгоритма формируется набор оптимальных по Парето решений, для решения задачи проектирования радиосети, необходимо выбрать единственный вариант сети, для этого необходимо привлечение дополнительной информации от лица принимающего решения. Методом выбора решения среди альтернатив был выбран метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати. Была

синтезирована гибридная методика поиска оптимального решения, отличающаяся сочетанием методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, характеризующийся оптимизационной эффективностью и применимая к различным техническим задачам, включающий 4 этапа:

1. Предварительный анализ;
2. Формирование Парето-оптимальных решений с помощью ГА;
3. Определение весовых коэффициентов с помощью МАИ;
4. Выбор единственного оптимального варианта сети с помощью методик целочисленного программирования.

Таким образом, были разработаны теоритические основы для разработки средства поддержки принятия решений для задач, возникающих при проектировании новых или модификации действующих телекоммуникационных сетей различных типов, отличающиеся от существующих возможностью обеспечения автоматизации процесса, что позволит существенно снизить риски принятия неправильного решения инженером планирования. Все предложенные модели отличаются от известных тем, что они адаптированы для использования в процедурах эволюционного моделирования.

4. Использование разработанных методик и алгоритмов частотно-территориального планирования в программном комплексе

4.1. Программный комплекс планирования сетей сотовой связи

4.1.1. Общие сведения о комплексе

Комплекс автоматизированного планирования радиосетей (GPRT) функционирует при использовании следующего общего программного обеспечения:

- операционная система рабочей станции – Microsoft Windows;
- система управления базами данных (СУБД) – PostgreSQL;
- геоинформационная система (ГИС) – GeoServer
- Java Development Kit.

Путь <http://localhost/GRPT/> - главная отображаемая форма программы СПО, в которой реализовано выполнение всех основных функций: отбор исходных данных, проведение расчетов, формирование выходных отчетов для документирования результатов.

4.1.2. Функциональное назначение комплекса

Комплекс планирования радиосетей предназначен для автоматизированного решения следующих задач:

- составление территориальных планов сотовых сетей третьего и четвертого поколений;
- составление частотных планов;
- оптимизация частотно-территориальных планов;
- сбор, аналитическую обработку, хранение и отображение данных о сотовых сетях (в текстовом, табличном и графическом форматах в зависимости от представляемой информации);
- формирование информационно-справочной базы данных по результатам планирования;

– сбор, обработку, хранение и отображение данных о БС, антеннах и средствах связи (в текстовом, табличном и графическом форматах в зависимости от представляемой информации).

4.1.3. Описание логической структуры комплекса

Программное обеспечение GPRT разработано на основе программной платформе, построенной с использованием объектно-ориентированных языков программирования Java и C++, с поддержкой системы управления баз данных PostgreSQL. Данное программное обеспечение функционирует под управлением операционных систем Microsoft Windows.

Для выполнения задач с использованием комплекса оператор взаимодействует через клиентское приложение с сервером приложения, где осуществляется решение расчетных задач, связь с ГИС и СУБД. Структурная схема взаимосвязей специального программного обеспечения, программной платформы и общего программного обеспечения представлена на рисунке 24.

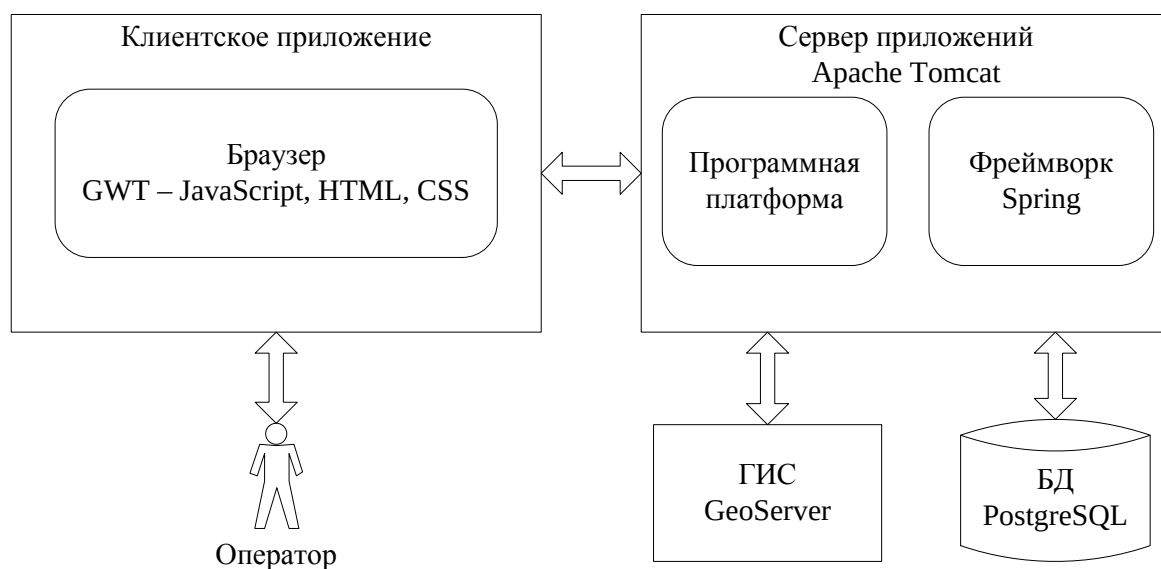


Рисунок 24 – Структурная схема взаимосвязей специального программного обеспечения, программной платформы и общего программного обеспечения

Клиентское приложение строится на основе Java фреймворка Google Web Toolkit, который позволяет создавать Ajax-приложения с расширенным графическим интерфейсом. Фреймворк клиентского приложения обеспечивает повторное использование визуальных компонентов и кросс-браузерную совместимость приложения.

Сервер приложений строится на базе контейнера сервлетов Apache Tomcat с открытым исходным кодом и программного фреймворка Spring. На основе этих составляющих функционирует программный продукт, созданный на платформе с функциональными модулями для решения задач комплекса. Для обеспечения высокой скорости расчетов и функциональной надежности, расчетные модули написаны на языке программирования C++.

При решении задач в комплексе используется модульная система подключения расчетных методик, по результатам расчетов которых формируются отчетные документы и картографические материалы. Обобщенная структура специального программного обеспечения приведена на рисунке 25:

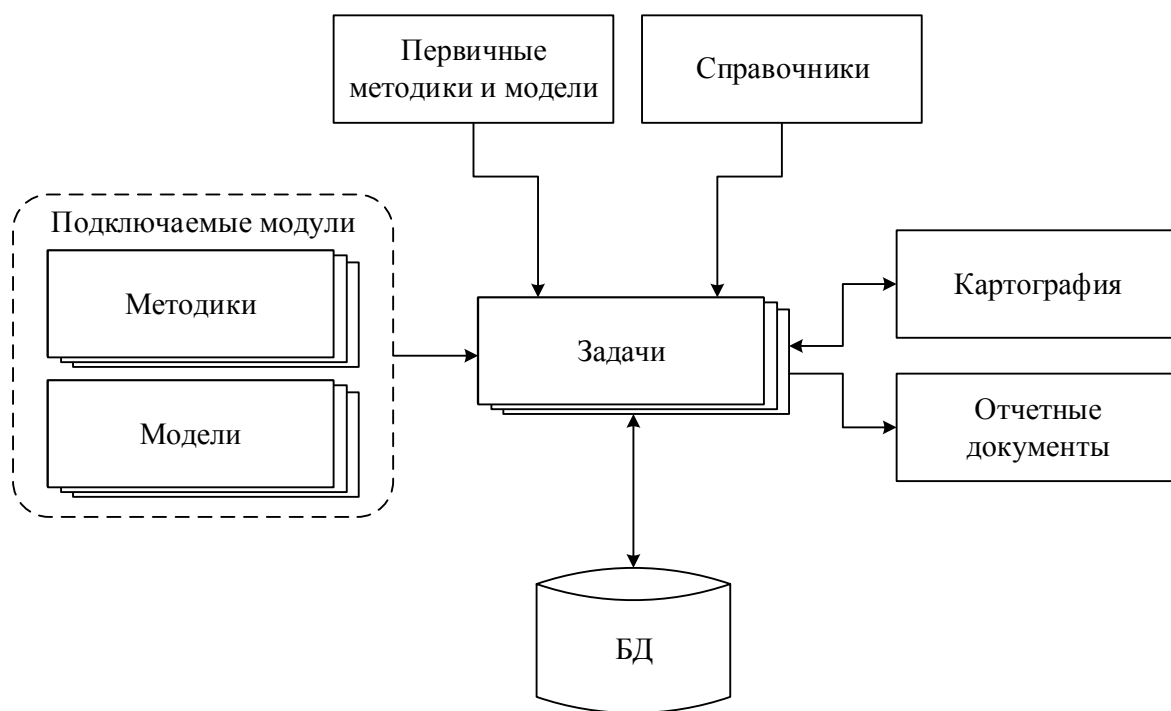


Рисунок 25 – Структура специального программного обеспечения

Для обеспечения технологичности разработанного программного комплекса применялось модульное программирование. Оно позволяет обеспечить функциональную целостность и завершенность отдельных модулей, а так же простую поддержку и эволюционируемость функциональных частей. Модульная структура разработанного программного обеспечения приведена на рисунке 26.

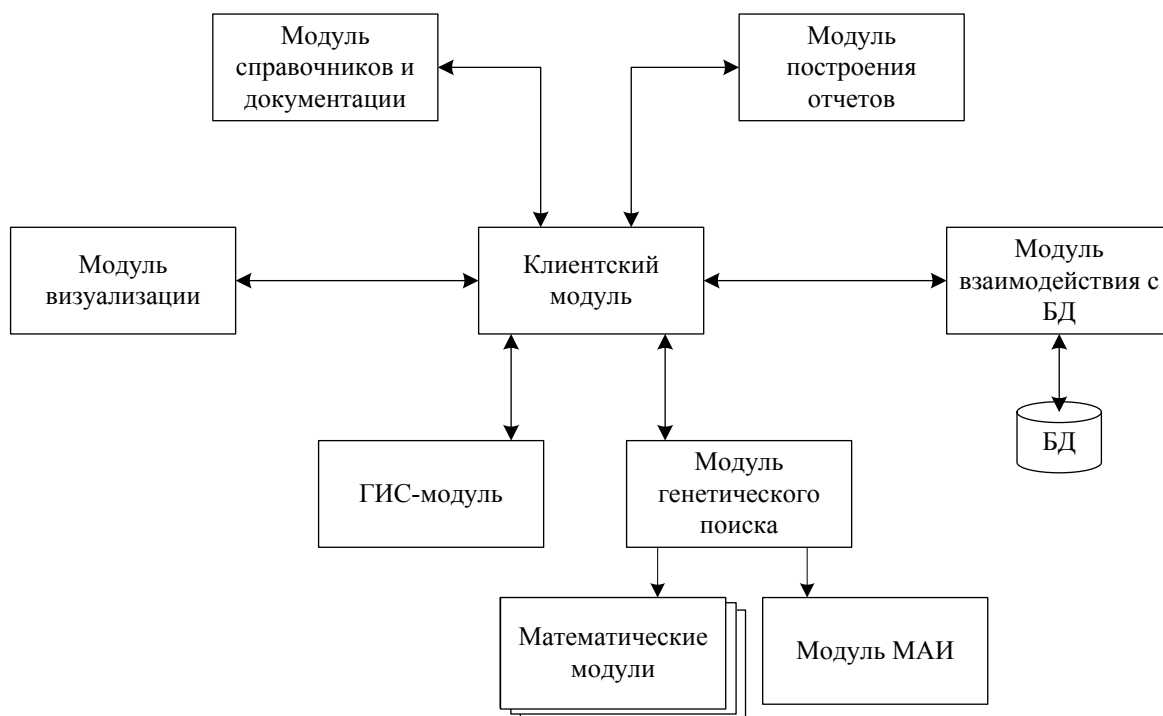


Рисунок 26 – Модульная структура комплекса планирования радиосетей

Далее представлено краткое описание используемых программных модулей:

- клиентский модуль – обеспечивает взаимосвязь между модулями и организует пользовательский интерфейс;
- модуль справочников и документации – содержит справочную информацию по организации работы с программой, описание методик и оборудования;
- модуль построения отчетов – реализует функции по формированию отчетных документов;
- модуль взаимодействия с БД – обеспечивает чтение и запись информации в БД;

- модуль генетического поиска – реализует методы генетических алгоритмов для поиска оптимальных решений;
- математические модули – обеспечивает математическими моделями модуль генетического поиска;
- ГИС-модуль – предоставляет интерфейс для взаимодействия с GeoServer и получения геопространственных данных;
- модуль МАИ – реализует оценку полученных решений с помощью метода анализа иерархий;
- модуль визуализации – обеспечивает визуализацию полученных результатов.

Функционирование СПО построено по принципу загрузки только необходимых в данный момент модулей.

Результаты измерений преобразуются с использованием первичных методик в набор обработанных параметров для последующего использования в соответствующих задачах комплекса. Каждая задача комплекса представляется совокупностью входных параметров, справочных данных и используемых методик. Все задачи формируются на основе обобщенной структуры, включающие только необходимый набор модулей и входных значений. При этом каждый промежуточный этап задачи сохраняется для протоколирования расчетов в БД. По окончании расчетов каждой задачи комплекса выдает отчётные документы (протоколы измерений). Также предусмотрена возможность вывода картографической информации.

4.1.4. Организация пользовательского интерфейса комплекса частотно-территориального планирования

Перед запуском программы необходимо войти в систему, что делается двойным нажатием на ярлык «GPRT», расположенный на рабочем столе, или открыв в системном браузере адрес комплекса.

При запуске приложения появится главное окно программы, предлагающее пройти авторизацию для доступа к функциям комплекса, представленное на рисунке 27.

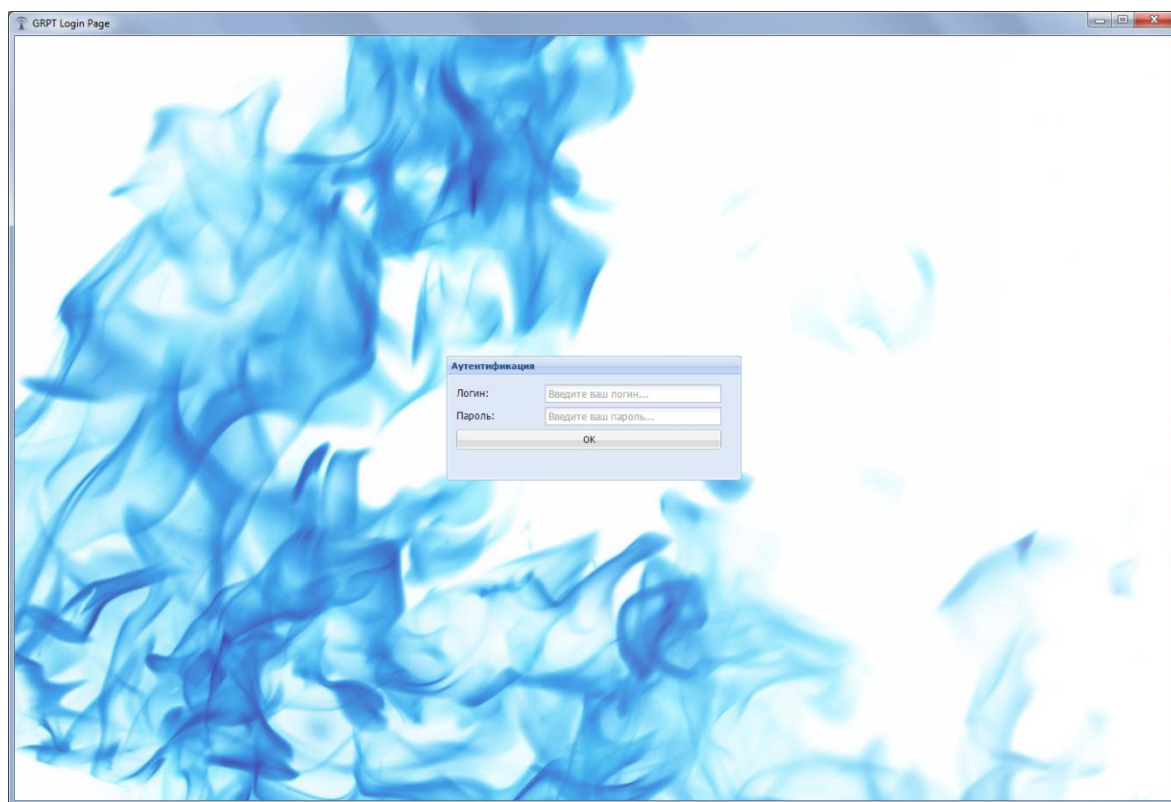


Рисунок 27 – Авторизация в программе

Для прохождения авторизации необходимо ввести логин и пароль пользователя, выданные администратором системы.

После ввода информации в поля «Логин» и «Пароль» оператор попадает в главное окно программы, представленное на рисунке 28. В главном окне отображены основные интерфейсы управления подсистемами программы. В верхней части представлено название программного продукта и «Логин» под которым вошел оператор, а также отображен элемент «Выход», позволяющий выйти из программы при нажатии по нему мышкой. В левой части экрана представлено основное меню программы, которое позволяет быстро переключаться по модулям системы. Каждый элемент меню группирует под собой одну из подсистем программы, например такую как «Методики и модели»,

содержащие в себе список всех методик, обеспечивающих автоматизацию планирования радиосетей.

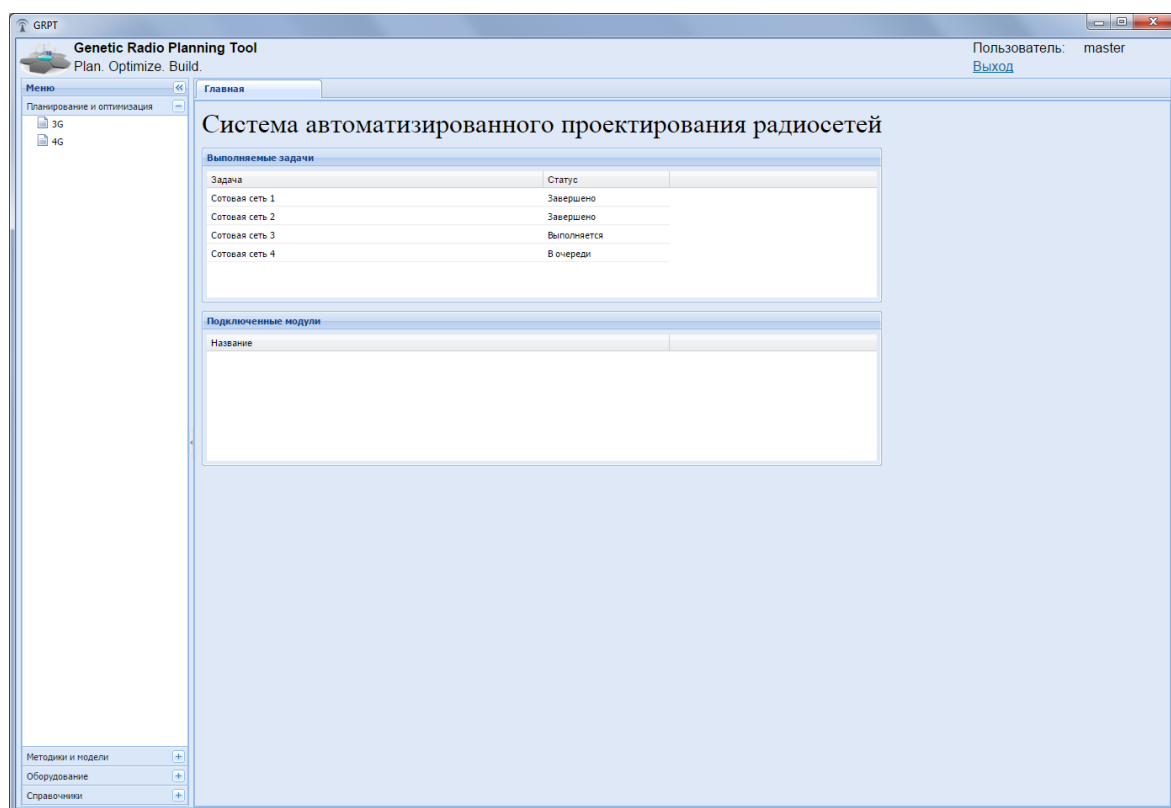


Рисунок 28 – Внешний вид главного окна программы

В центральной части программы расположена главная форма, на которой представлены два раздела:

- Выполняемые задачи;
- Подключенные модули.

В разделе «Выполняемые задачи» для оператора представлен список текущих задач комплекса с состоянием, описываемым четырьмя статусами:

- завершено;
- выполняется;
- в очереди;
- некорректно.

Статус «завершено» определяет задачу как готовую к просмотру и использованию, «выполняется» – когда идет расчет задачи комплексом, «в

очереди» – когда задача ждет высвобождения вычислительных ресурсов для начала расчета, «некорректно» – при наличии ошибок в расчете.

В разделе «Подключенные модули» представлены дополнительные модули, необходимые для проведения расчетов (модели распространения сигнала, методики планирования радиосетей различных стандартов и т.п.).

Программный комплекс реализует решение наиболее важных задач, возникаемых в процессе планирования сотовой радиосети: разработка территориального плана сетей стандарта 3G и 4G, разработка частотного плана.

Для проектирования сотовой сети оператор выбирает в разделе меню «Планирование и оптимизация» необходимый стандарт связи и переходит в режим планирования (рис. 29).

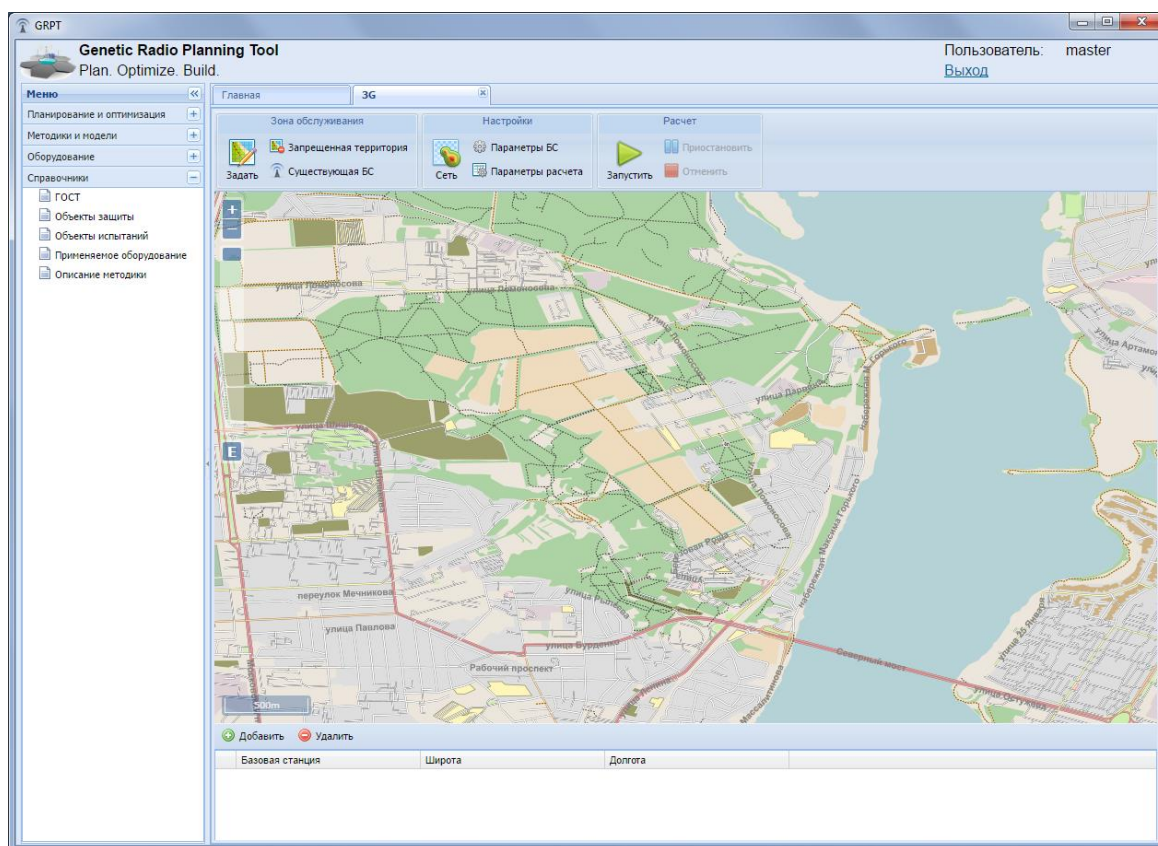


Рисунок 29 – Проектирование сети стандарта 3G

В комплексе существует 3 сценария планирования сети:

- планирование новой сети;
- планирование новой сети с учетом приоритетных зон;

– модернизация существующей сети.

В центральной части данного окна расположена электронная карта местности. Выбор начальных условий расчета осуществляется с помощью ряда кнопок, объединенных в три группы:

- «Задать» – выбор области, для которой будет рассчитывать проект;
- «Существующая БС» – задание координат для уже существующих на местности БС для учета их в расчетах;
- «Запрещенную территорию» – выделение на карте территорий, на которых запрещено ставить БС;
- «Сеть» – задание параметров сети (рис. 30). Оператору предоставляется возможность задать название проектируемой сети, выбрать радиостандарт, верхний и нижний пределы частот передачи, величину разноса между частотами приема и передачи, ширину полосы одного частотного канала, отношение сигнал/помеха, требуемое в системе, количество информационных каналов в одной полосе канала, количество частотных групп, уровень внешних помех для станций данной сети и число частотных каналов;

Параметры сотовой сети	
Наименование сети:	
Радио стандарт:	GSM-1800
Нижняя частота передачи, МГц:	935
Верхняя частота передачи, МГц:	960
Дуплексный разнос, МГц:	-45
Полоса канала, МГц:	200
Требуемый сигнал/помеха, дБ:	9
Число информационных каналов:	8
Число частотных групп:	1
Внешняя помеха, дБ:	
Число частотных каналов:	
Сохранить и закрыть	

Рисунок 30 – Параметры сотовой сети

- «Параметры БС» – при нажатии на данную кнопку открывается окно настроек БС, которые будут использоваться в расчете;
- «Параметры расчета» – изменение параметров текущего расчета (тонкая настройка генетического алгоритма, выбор моделей распространения сигнала).
- «Запустить» – запуск расчета с выбранными параметрами на выбранной территории;
- «Приостановить» – временная остановка расчета;
- «Отменить» – остановка выполняемого задания.

Ниже карты расположен редактируемый список существующих БС с координатами.

Форма для проектирования сети стандарта 4G аналогична форме 3G.

Для задания матриц попарных сравнений при выборе оптимального проектного варианта в соответствии с принципами МАИ и выбранными показателями качества, разработаны формы, представленные на рис. 31.

Попарные сравнения: Надежность

	Число срывов	Количество блокировок	Емкость
Число срывов	1	0.333	0.2
Количество блокировок	3	1	0.111
Емкость	5	9	1

Собственные значения

Показатель	Значение
Число срывов	0.087
Количество блокировок	0.149
Емкость	0.764

Шкала относительной важности

Степень важности	Определение	Пояснение
1	Одинаковая значимость	Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Некоторое преобладание значимости одного действия перед другим (слабая значимость)	Существуют соображения в пользу предпочтения одного из объектов, однако эти соображения недостаточно убедительны
5	Существенная или сильная значимость	Имеются надежные данные и логические соображения для того, чтобы показать предпочтительность одного из объектов
7	Очевидная значимость	Убедительное свидетельство в пользу предпочтения одного объекта другому
9	Абсолютная значимость	Свидетельство в пользу предпочтения одного объекта перед другой в высшей степени убедительны
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между двумя суждениями	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение
Обратные величины приведенных чисел Если элементу i при сравнении с элементом j приписывается одно из приведенных выше чисел то элементу j; при сравнении с i приписывается обратное значение.		

Рисунок 31 – Матрицы попарных сравнений

4.2. Планирование сотовой сети мобильной связи стандарта GSM-1800

Данный раздел имеет целью показать область применимости и достоверность приведенных ранее алгоритмов и методик частотно-территориального планирования сетей радиосвязи. Примеры планирования выполнены с использованием разработанной САПР «GRPT», и используют исходные данные, взятые из реальных проектов сетей.

Как было обозначено ранее, основными целями частотно-территориального планирования являются:

- обеспечение покрытия требуемой зоны обслуживания с требуемым качеством связи;
- обеспечение емкости для обслуживания абонентской нагрузки с допустимым уровнем блокирования вызова;
- минимизация стоимости инфраструктуры сети.

Общие характеристики сети, технические характеристики приемо-передающего оборудования и антенн радиостанций приведены в табл. 11-13.

Таблица 11 – Общие характеристики сети

Наименование	Обозначение, единица измерения	Значение характеристики
Стандарт системы	—	GSM-1800
Класс излучения	—	200KF7W
Полоса частот: передача МС; передача БС	$F_{min} \dots F_{max}$ МГц	1710...1785 1805...1880
Количество радиоканалов	$n_{общ}$, шт.	36
Количество абонентов	N_a , тыс.	Не менее 25
Предполагаемая нагрузка от одного абонента	A_1 , Эрл	0,03

Вероятность блокирования вызова в ЧНН	$P_0, \%$	2
Требуемая зона обслуживания	—	Указывается на карте
Допустимый процент мест с ухудшением качества связи	$L, \%$	10
Местоположение мобильных станций	—	На улицах, в зданиях, в автомобилях
Потери на проникновение: в здание; в автомобиль	$W_9, \text{дБ}$	15 8
Защитное отношение сигнал/помеха в совмещенном канале	$A_0, \text{дБ}$	9
Высота антенны МС над землей	$h_{MS}, \text{м.}$	1.5

Таблица 12 – Технические характеристики приемопередающего оборудования

Наименование	Обозначение, единица измерения	Значения характеристики станций		
		базовой	мобильной	
Назначение радиостанции	—		1-го класса	2-го класса
Тип радиостанции	—	RBS 2202 ERICSSON		
Максимальная мощность передатчика (на входе антенного фидера)	$P_{\max}, \text{Вт.}$	22	1	0,25
Количество приемопередатчиков	$n_n, \text{шт.}$	1–6	—	—
Количество секторов	$n_c, \text{шт.}$	1–3	—	—
Потери мощности передатчика: в фидере; в комбайнере	$\eta_\phi, \text{дБ/100м}$	6,2	—	—
	$\eta_k, \text{дБ}$	3	—	—
Реальная чувствительность приемника	$P_{on}, \text{дБм}$	–110	–102	–102

Таблица 13 – Технические характеристики антенн радиостанций

Наименование	Обозначение, единица измерения	Значение характеристики			
		базовой			мобильной
Тип антенны	–	K739494	K739495	K739496	3 / 4λ
Максимальный коэффициент усиления	G_0 , дБи	18	18	18	0
Потери передачи в дуплексном фильтре типа ТМА1800	B_ϕ , дБ	1,5	1,5	1,5	–
Потери в тракте приема	$K_{МШУ}$, дБ	10	10	10	–
Ширина ДН на уровне -3 дБ:	град				
в горизонтальной плоскости;	$2\varphi_0$	65	65	65	360
в вертикальной плоскости	$2\Delta_0$	6,5	7,0(2Т)	7,0(2Т)	–
Ослабление боковых и задних лепестков ДН в горизонтальной плоскости	Q , ДБ	>25	>30	>30	–

Разрабатывается сеть связи для территориальной зоны, включающей Ленинский, Пролетарский, Ворошиловский, Первомайский районы города Ростов-на-Дону. В этой территориальной зоне обеспечивается сплошное покрытие при местонахождении абонентов на улицах, в автомобилях и зданиях.

На втором этапе подготовлены исходные данные, использованные для разработки проекта частотно-территориального плана сети связи. Результаты второго этапа планирования представлены на рис. 33 – 33.

В сети стандарта GSM-1800 возможно осуществить более «жесткий» режим повторного использования частот, чем в сетях GSM-900, за счет меньшей дифракции на препятствиях и большего затухания на местности, из-за чего происходит пространственная локализация излучения отдельных базовых станций, и уменьшается тем самым соканальная интерференция.

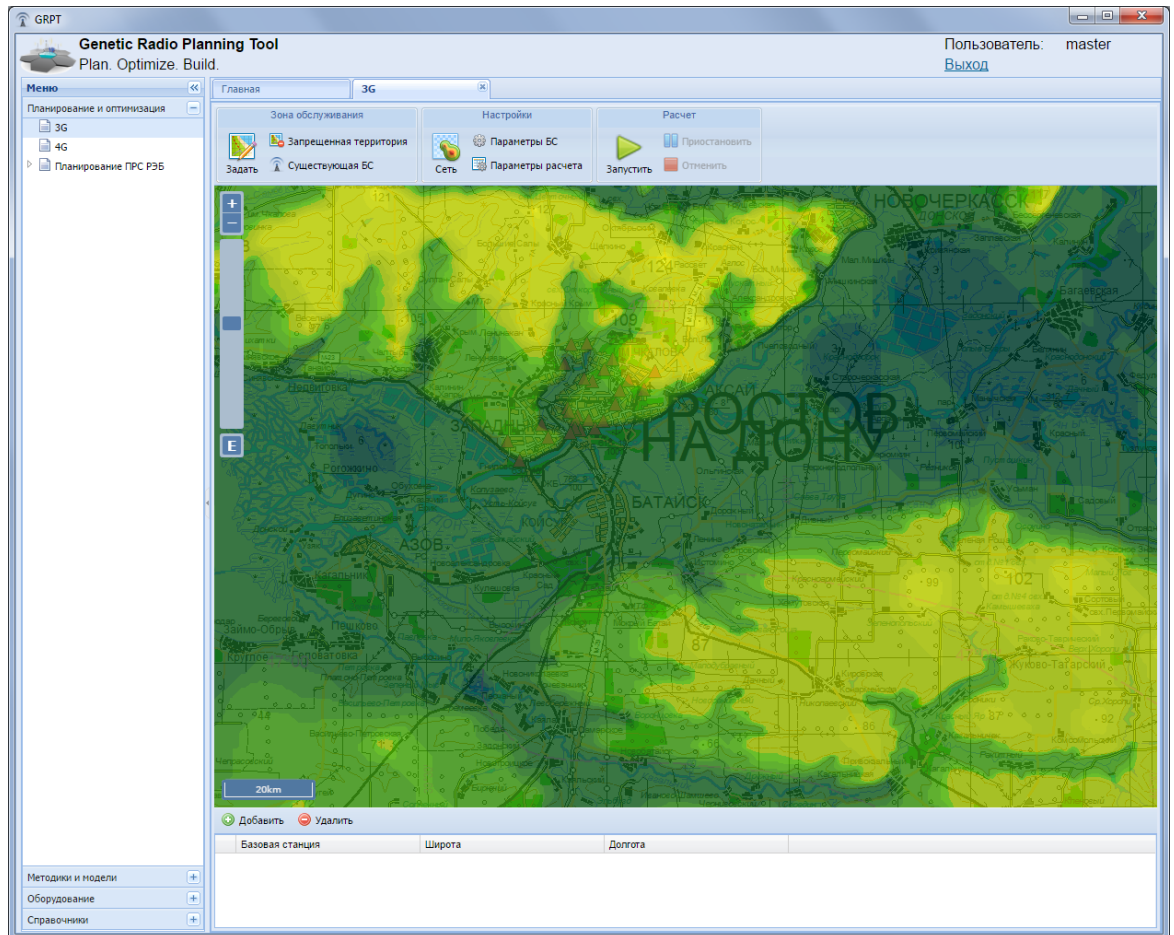


Рисунок 32 – Матрица высот

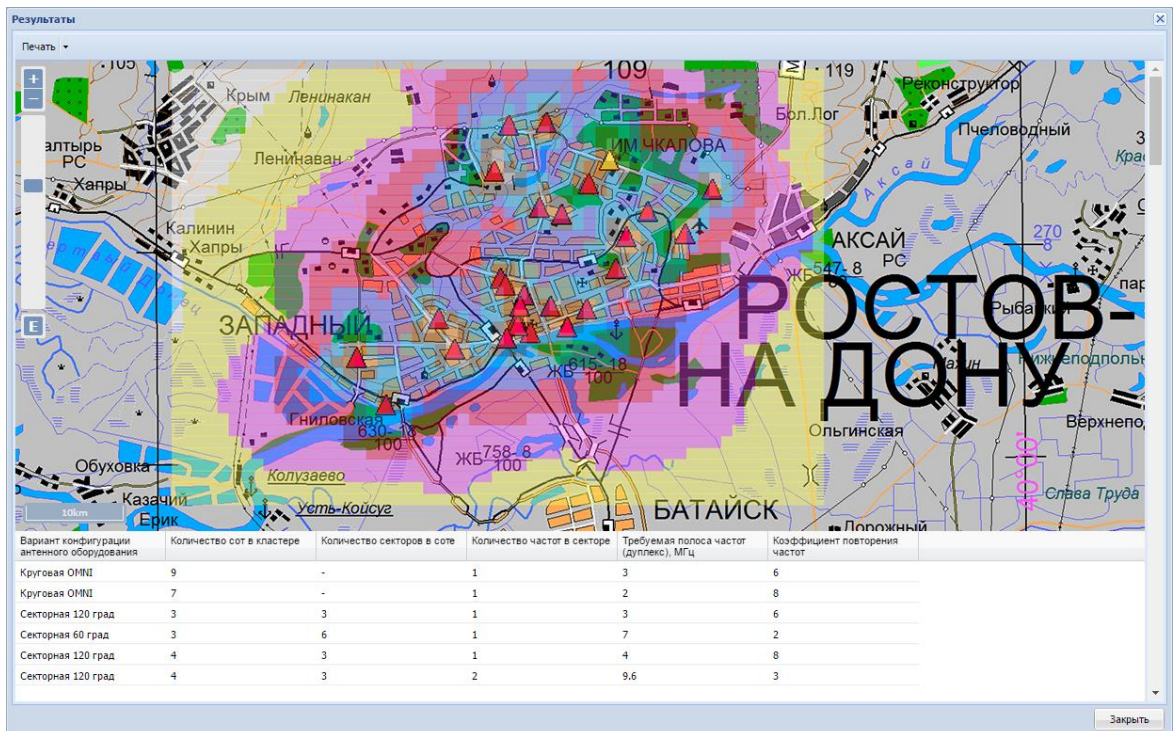


Рисунок 33 – Напряженность электромагнитного поля

Результаты расчета пространственных параметров сети и параметров базовых станций представлены на рисунках 34, 35.

Результаты		
Печать ▾		
Энергетические характеристики, параметры	Передача БС-МС	Передача МС-БС
1. Бюджет потерь		
Мощность передатчика, Вт	22	1
Мощность передатчика, дБм	43,4	30
Потери в фидере антенны ПРД, дБ	2	0
Потери в дуплексном фильтре, дБ	1,5	-
КУ антенны ПРД, дБи	18	0
Излучаемая мощность, дБм	57,9	30
Чувствительность приемника, дБм	-102	-110
Потери в фидере антенны ПРМ, дБ	0	2
КУ антенного усилителя тракта приема, дБ	-	10
КУ антенны ПРМ, дБи	0	18
Необходимая мощность полезного сигнала с вероятностью 50%, дБм	-102	-136
Необходимая напряженность поля полезного сигнала с вероятностью 50%, дБ(мкВ/м)	40,3	6,3
Среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуаций сигнала, дБ	8	8
Параметр логнормального распределения уровней сигнала по местоположению с вероятностью 75%	0,68	0,68
Необходимая мощность полезного сигнала на границе зоны обслуживания с вероятностью 75%, дБм	-96,6	-130,6
Необходимая напряженность поля полезного сигнала на границе зоны обслуживания с вероятностью 75%, дБ(мкВ/м)	45,7	11,7
Потери в теле абонента, дБ	3	3
Потери на проникновение дБ		
в автомобиле;	8	8
в здании	15	15
Допустимые основные потери передачи с вероятностью 50%, дБ при нахождении АС:		
на улице;	156,9	163,0
в автомобиле;	148,9	155,0
в здании	141,9	148,0
Допустимые основные потери передачи с вероятностью 75%, дБ при нахождении АС:		
на улице;	151,5	157,6
в автомобиле;	143,5	149,6
в здании	136,5	142,6
2. Максимальная дальность связи с вероятностью 75% на границе зоны обслуживания, км, при нахождении АС:		
на улице;	2,5	
в автомобиле;	1,5	
в здании	0,95	
3. Максимальная дальность соканальных помех:		
Защитное отношение сигнал/помеха с вероятностью 50 %, дБ	9	
Защитное отношение сигнал/помеха с вероятностью 75 %, на границе зоны обслуживания, дБ	16,7	
Максимальная дальность соканальных помех на границе зоны обслуживания, км, при нахождении АС:		
на улице;	7,4	
в автомобиле;	4,5	
в здании	2,8	

Рисунок 34 – Бюджет потерь, максимальные дальности связи и соканальных помех в сети связи GSM-1800

Результаты											
Печать											
№ п.п.	Координаты	На, м	Аз-т сек-тора, град.	КУ ант., дБ	Потери в АФТ, дБ	Ррпд, Вт	Высота от уровня моря	Угол места	Ширина ДНА в гор. пл-ти	Ширина ДНА в верт. пл-ти	
1	47°14'30с.ш. 39°45'55е.д.	16	0	17,9	6	20	56	-2	65	6,5	
		16	120	17,9	6	20	56	-2	65	6,5	
		16	240	17,9	6	20	56	-2	65	6,5	
2	47°15'19с.ш. 39°48'20е.д.	16	0	17,9	2	20	56	-2	65	6,5	
		16	240	17,9	2	20	56	-3	65	6,5	
3	47°11'21с.ш. 39°37'56е.д.	19	0	17,9	2	20	29	-5	65	6,5	
		19	120	17,9	2	20	29	-6	65	6,5	
		19	240	17,9	2	20	29	-6	65	6,5	
4	47°13'22с.ш. 39°39'46е.д.	22	130	17,9	2	20	62	-4	65	8,5	
		22	220	17,9	2	20	62	-3	65	6,5	
		22	310	17,9	2	20	62	-4	65	6,5	
5	47°15'50с.ш. 39°47'02е.д.	22	0	17,9	4,8	20	62	-6	65	6,5	
		22	120	17,9	4,8	20	62	-6	65	6,5	
		22	240	17,9	4,8	20	62	-6	65	6,5	
6	47°17'05с.ш. 39°45'44е.д.	17	0	17,9	2	20	97	-2	65	6,5	
		19	120	17,9	2	20	99	-2	65	6,5	
		17	240	17,9	2	20	97	-2	65	6,5	
7	47°13'38с.ш. 39°43'39е.д.	24	0	17,9	2	20	84	-6	65	6,5	
		25	120	17,9	2	20	85	-2	65	6,5	
		27	255	17,9	2	20	87	-6	65	6,5	
8	47°15'16с.ш. 39°46'17е.д.	22	120	17,9	4	20	102	-2	65	6,5	
		22	240	17,9	4	20	102	-2	65	6,5	
		22	330	17,9	4	20	102	-2	65	6,5	
9	47°12'38с.ш. 39°40'19е.д.	25	0	17,9	2	20	105	-3	65	6,5	
		23	120	17,9	2	20	103	-4	65	6,5	
		23	240	17,9	2	20	103	-4	65	6,5	
10	47°16'30с.ш. 39°45'01е.д.	24	0	17,9	2	20	104	-4	65	6,5	
		24	120	17,9	2	20	104	-5	65	6,5	
		26	240	17,9	2	20	106	-5	65	6,5	
11	47°13'09с.ш. 39°44'13е.д.	20	0	17,9	2	20	40	-2	65	6,5	
		16	120	17,9	2	20	36	-8	65	6,5	
		16	240	17,9	2	20	36	-2	65	6,5	
12	47°14'19с.ш. 39°41'56е.д.	17	0	17,9	2	20	57	-6	65	6,5	
		16	120	17,9	2	20	56	-6	65	6,5	
		17	240	17,9	2	20	57	-6	65	6,5	
13	47°13'54с.ш. 39°42'44е.д.	22,5	25	17,9	2	20	82,5	-6	65	6,5	
		20	150	17,9	2	20	80	-6	65	6,5	
		20	240	17,9	2	20	80	-6	65	6,5	
14	47°17'57с.ш. 39°43'33е.д.	35,5	0	17,9	2	20	95,5	-4	65	6,5	
		33	120	17,9	2	20	93	-5	65	6,5	
		35,5	240	17,9	2	20	95,5	-5	65	6,5	
15	47°13'35с.ш. 39°44'54е.д.	32	0	17,9	2	20	92	-6	65	6,5	
		32	120	17,9	2	20	92	-6	65	6,5	
		32	240	17,9	2	20	92	-6	65	6,5	
16	47°15'48с.ш. 39°44'03е.д.	24	0	17,9	2	20	104	-6	65	8,5	
		24	120	17,9	2	20	104	-6	65	6,5	
		24	240	17,9	2	20	104	-6	65	6,5	
17	47°13'20с.ш. 39°42'30е.д.	16	0	17,9	2	20	36	-2	65	6,5	
		16	120	17,9	2	20	36	-2	65	6,5	
		16	240	17,9	2	20	36	-2	65	6,5	
18	47°12'28с.ш. 39°36'56е.д.	26	0	17,9	2	20	86	-3	65	6,5	
		26	120	17,9	2	20	86	-3	65	6,5	
		26	240	17,9	2	20	86	-4	65	6,5	
19	47°15'59с.ш. 39°43'18е.д.	12	25	17,9	2	20	72	-6	65	8,5	
		12	150	17,9	2	20	72	-6	65	6,5	
		12	240	17,9	2	20	72	-6	65	6,5	
20	47°13'39с.ш. 39°42'35е.д.	20	0	17,9	2	20	60	-3	65	6,5	
		23	120	17,9	2	20	63	-5	65	6,5	
		20	240	17,9	2	20	60	-5	65	6,5	
21	47°16'50с.ш. 39°41'45е.д.	24	0	17,9	2	20	64	-2	65	6,5	
		24	120	17,9	2	20	64	-2	65	6,5	
		24	240	17,9	2	20	64	-2	65	6,5	
22	47°13'02с.ш. 39°42'57е.д.	20	25	17,9	4	20	60	-3	65	6,5	
		20	120	17,9	4	20	60	-3	65	6,5	
		20	240	17,9	4	20	60	-3	65	6,5	
23	47°16'22с.ш. 39°49'17е.д.	41	0	17,9	2	20	131	-4	65	6,5	
		41	120	17,9	2	20	131	-6	65	6,5	
		41	240	17,9	2	20	131	-6	65	6,5	
24	47°14'08с.ш. 39°42'05е.д.	25	0	17,9	2	20	85	-4	65	6,5	
		25	120	17,9	2	20	85	-4	65	6,5	
		25	240	17,9	2	20	85	-5	65	6,5	
25	47°13'11с.ш. 39°42'31е.д.	24	0	17,9	2	20	64	-4	65	6,5	
		24	120	17,9	2	20	64	-4	65	6,5	
		21	240	17,9	2	20	61	-5	65	6,5	
26	47°17'55с.ш. 39°42'16е.д.	62	0	17,9	2	20	122	-8	65	6,5	
		62	120	17,9	2	20	122	-8	65	6,5	
		62	270	17,9	2	20	122	-8	65	6,5	
27	47°12'54с.ш. 39°42'07е.д.	25	0	17,9	2	20	45	-4	65	6,5	
		25	120	17,9	2	20	45	-4	65	6,5	
		25	240	17,9	2	20	45	-5	65	6,5	

Рисунок 35 – Параметры базовых станций

Из рисунка видно, что максимальная дальность связи с вероятностью 75 % на границе зоны обслуживания при нахождении МС в зданиях составляет $R_{0\max} = 0,95$ км.

Учитывая, что площадь одной трехсекторной ячейки можно определить следующим образом:

$$S_{3c} = \frac{9\sqrt{3}}{8} R_0^2 = \frac{9\sqrt{3}}{8} 0,95^2 \approx 1,75 \text{ км}^2,$$

то минимальное количество БС, необходимое для сплошного покрытия центральной территориальной зоны площадью 75 км² при регулярной структуре их размещения, составляет 42 шт. Системой получен вариант покрытия заданной территории с помощью 27 БС.

Расчет зон обслуживания производился для каждого варианта местонахождения АС (в зданиях, автомобилях и на улицах) с помощью системы автоматизированного планирования радиосетей в диапазоне частот от 0,15 до 2 ГГц с использованием цифровых карт местности.

Для расчета использовались следующие данные:

- координаты и характеристики РЭС;
- рельеф местности;
- данные по типам застройки;
- водоемы (моря, озера и реки);
- лесные массивы;
- дороги.

Расчет потерь производился с использованием модели Хата в соответствии с методикой COST 231.

Частотное планирование производилось с учетом общего территориального плана сети связи и заключалось:

- в расчете зон соканальных помех для всех секторов БС;
- построении матрицы ЭМС для сочетания секторов;
- распределении частотного ресурса по секторам БС;

– уточнении максимального количества обслуживаемых абонентов сети связи.

Частотное планирование для сетей GSM-1800 осуществлялось в диапазонах частот:

- линия вверх (прием) 1710...1785 МГц;
- линия вниз (передача) 1805...1880 МГц.

Общее количество частотных каналов в стандарте GSM-1800 – 374.

В процессе оптимизации исходного решения уточнялись зоны обслуживания (охвата) при нахождении абонентов в зданиях, автомобилях и на улицах.

Установлено, что при любом местонахождении абонентов обеспечивается практически сплошное покрытие всей зоны обслуживания площадью 33 км².

Таким образом, в соответствии с требованиями разработан частотно-территориальный план сотовой сети связи GSM-1800, включающий:

– Территориальный план сети, в соответствии с которым обеспечивается сплошное покрытие с хорошим качеством связи при любом местоположении абонентов (на улицах, в автомобилях и в зданиях).

– Частотный план сети, который определяет частотные назначения по 81 секторам БС с кратностью использования до пятнадцати раз. Выделенный частотный ресурс позволяет исключить соканальные помехи при нахождении абонентов в зданиях и автомобилях зоны охвата.

– Максимальное количество обслуживаемых абонентов сети связи при частотном ресурсе, позволяющем выделить только по два радиоканала на каждый сектор, составляет не менее 38,25 тыс.

4.3. Подсистема автоматизации проектирования сетей LTE

В процессе планирования радиосетей LTE имеется ряд отличий от процесса планирования других технологий беспроводного радиодоступа. Главное отличие – это использование нового типа многостанционного доступа на базе технологии OFDM, в связи с чем появляются новые понятия и изменяются алгоритмы проектирования, рассмотренные в предыдущих разделах.

Подсистема, обеспечивающая автоматизацию построения подобной сети, была разработана в качестве подключаемого модуля для комплекса «GRPT» (рис.)

Планирование радиосети LTE будет производиться в сельской местности для Семилукского района Воронежской области, это означает невысокую плотность абонентов, таким образом, базовые станции должны устанавливаться на удалении друг от друга с целью обеспечения наибольшего покрытия.

Требуется обеспечение устойчивого сигнала LTE на территории 200 км² с населением 60 тыс. человек (рис. 36)

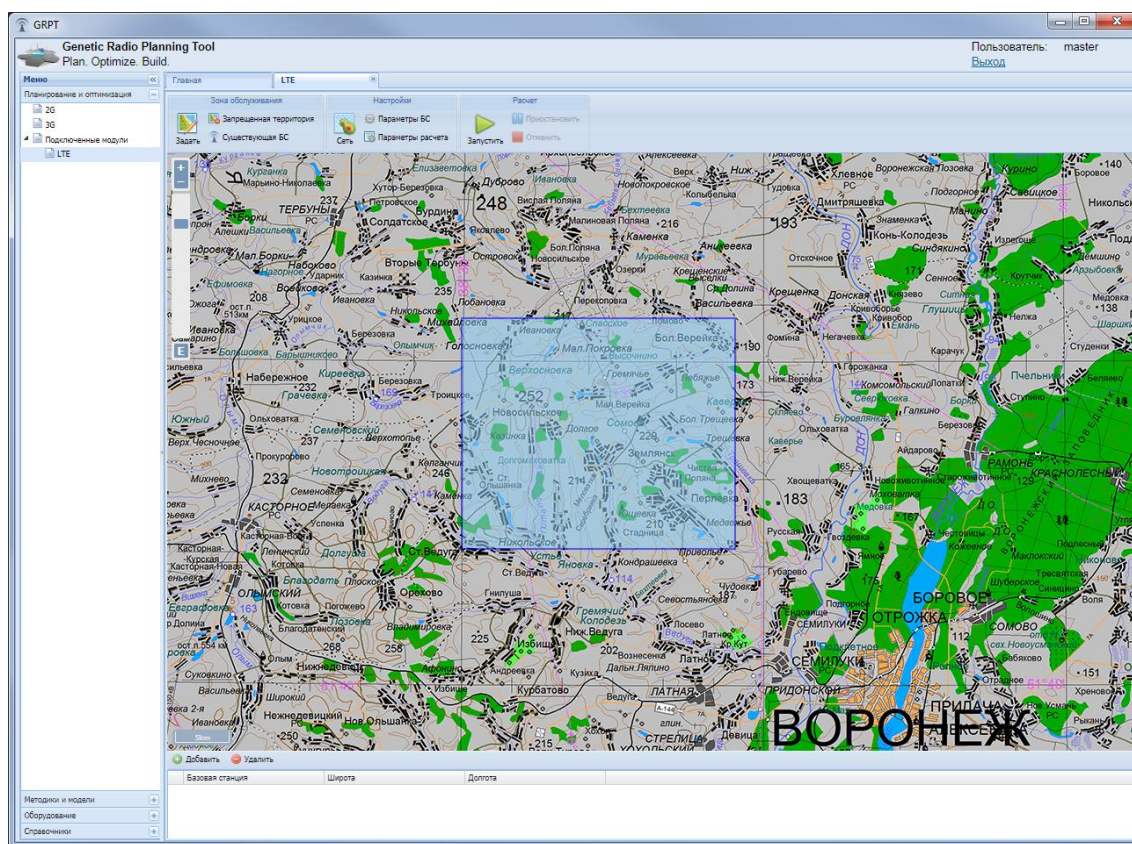


Рисунок 36 – Зона планирования LTE

Основные характеристики базовых и абонентских станций сетей связи стандарта LTE в полосах радиочастот 2500-2570 МГц и 2620-2690 МГц сведены в табл. 14.

Таблица 14 – Основные тактико-технические характеристики РЭС

Наименование параметра	Значение параметра	
	Абонентская станция	Базовая станция
Метод радиодоступа	SC-FDMA	OFDMA
Рабочий диапазон частот, МГц	ПРД 2500-2570 ПРМ 2620-2690	ПРД 2620-2690 ПРМ 2500-2570
Тип дуплекса	FDD	
Классы излучения	10M0G7W 10M0D7W	
Уровни внеполосных излучений	В соответствии с Рек. МСЭ-RM.1581	В соответствии с Рек. МСЭ-RM.1580
Максимальная мощность передатчика, дБм (в том числе и суммарная мощность передатчиков в конфигурации MIMO)	23	46
Побочные излучения	В соответствии с действующими нормами ГКРЧ	
Максимальный коэффициент усиления антенны, дБ	3	19

Результаты расчета пространственных параметров сети и параметров базовых станций представлены на рисунках 37 38.

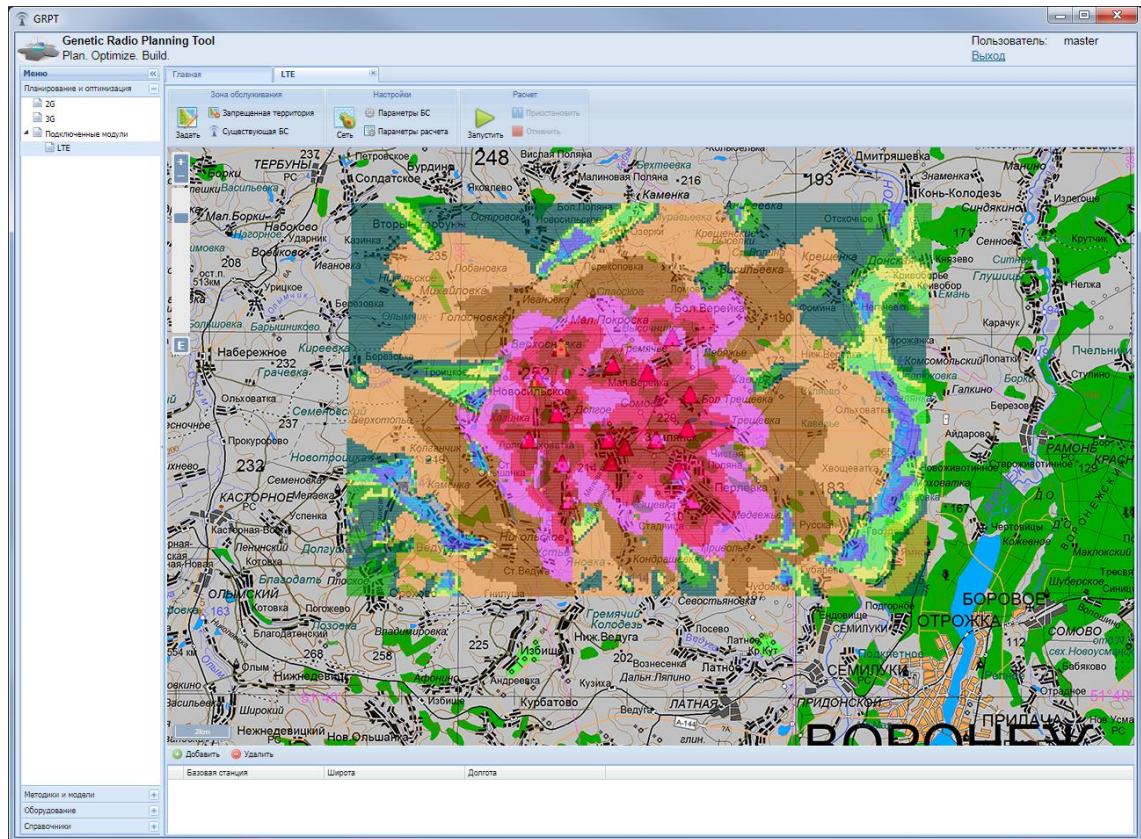


Рисунок 37 – Напряженность электромагнитного поля сети LTE

Результаты										
Печать										
№ п.п.	Координаты	На, м	Азимут сектора, град.	КУ ант., дБ	Потери в АФТ, дБ	Ррлд, Вт	Высота от уровня моря	Угол места	Ширина ДНА в гор. пл-ти	Ширина ДНА в верт. пл-ти
1	51°55'23" с.ш. 38°44'19" в.д.	15	60	20.0	1.5	40	206	0	65	9
		15	180	20.0	1.5	40	206	0	65	9
		15	300	20.0	1.5	40	206	0	65	9
2	51°55'23" с.ш. 38°44'18" в.д.	26	60	20.0	1.5	40	166	0	65	9
		26	180	20.0	1.5	40	166	0	65	9
		26	300	20.0	1.5	40	166	0	65	9
3	51°55'23" с.ш. 38°44'17" в.д.	24	40	20.0	1.5	40	171	0	65	9
		24	220	20.0	1.5	40	171	0	65	9
		24	310	20.0	1.5	40	171	0	65	9
4	51°55'23" с.ш. 38°44'16" в.д.	16	40	20.0	1.5	40	204	0	65	9
		16	160	20.0	1.5	40	204	0	65	9
		16	310	20.0	1.5	40	204	0	65	9
5	51°55'23" с.ш. 38°44'15" в.д.	15	90	20.0	1.5	40	197	0	65	9
		15	220	20.0	1.5	40	197	0	65	9
		15	330	20.0	1.5	40	197	0	65	9
6	51°55'23" с.ш. 38°45'19" в.д.	26	0	20.0	1.5	40	210	0	65	9
		26	120	20.0	1.5	40	210	0	65	9
		26	240	20.0	1.5	40	210	0	65	9
7	51°54'23" с.ш. 38°44'19" в.д.	38	60	20.0	1.5	40	183	0	65	9
		38	180	20.0	1.5	40	183	0	65	9
		38	300	20.0	1.5	40	183	0	65	9
8	51°55'23" с.ш. 38°44'19" в.д.	23	60	20.0	1.5	40	191	0	65	9
		23	150	20.0	1.5	40	191	0	65	9
		23	240	20.0	1.5	40	191	0	65	9
9	51°55'28" с.ш. 38°44'19" в.д.	26	0	20.0	1.5	40	196	0	65	9
		26	120	20.0	1.5	40	196	0	65	9
		26	240	20.0	1.5	40	196	0	65	9
10	51°55'23" с.ш. 38°44'11" в.д.	25	60	20.0	1.5	40	193	0	65	9
		25	180	20.0	1.5	40	193	0	65	9
		25	300	20.0	1.5	40	193	0	65	9
11	51°55'25" с.ш. 38°44'19" в.д.	21	60	20.0	1.5	40	180	0	65	9
		21	180	20.0	1.5	40	180	0	65	9
		21	300	20.0	1.5	40	180	0	65	9
12	51°55'33" с.ш. 38°44'19" в.д.	30	0	20.0	1.5	40	229	0	65	9
		30	90	20.0	1.5	40	229	0	65	9
		30	180	20.0	1.5	40	229	0	65	9
13	51°55'23" с.ш. 38°44'29" в.д.	18	60	20.0	1.5	40	185	0	65	9
		18	180	20.0	1.5	40	185	0	65	9
		18	270	20.0	1.5	40	185	0	65	9
14	51°55'27" с.ш. 38°44'19" в.д.	31	30	20.0	1.5	40	178	0	65	9
		31	100	20.0	1.5	40	178	0	65	9
		31	180	20.0	1.5	40	178	0	65	9
15	51°55'23" с.ш. 38°44'39" в.д.	25	45	20.0	1.5	40	193	0	65	9
		25	145	20.0	1.5	40	193	0	65	9
		25	300	20.0	1.5	40	193	0	65	9
16	51°55'26" с.ш. 38°44'19" в.д.	30	0	20.0	1.5	40	166	0	65	9
		30	90	20.0	1.5	40	166	0	65	9
		30	180	20.0	1.5	40	166	0	65	9
17	52°55'23" с.ш. 39°44'11" в.д.	19	60	20.0	1.5	40	185	0	65	9
		19	180	20.0	1.5	40	185	0	65	9
		19	310	20.0	1.5	40	185	0	65	9
18	51°55'23" с.ш. 38°44'25" в.д.	25	30	20.0	1.5	40	200	0	65	9
		25	120	20.0	1.5	40	200	0	65	9
		25	300	20.0	1.5	40	200	0	65	9

Рисунок 38 – Параметры базовых станций сети LTE

Таким образом, в результате планирования был получен частотно-территориальный план сети стандарта LTE, обеспечивающий покрытие 97% заданной территории сигналом с напряжённостью выше 75 дБ.

4.4. Анализ эффективности разработанных методик

В настоящее время основным методом проектирования сложных сетей радиосвязи является тесная работа нескольких групп опытных инженеров (рис 39) [116, 132]:

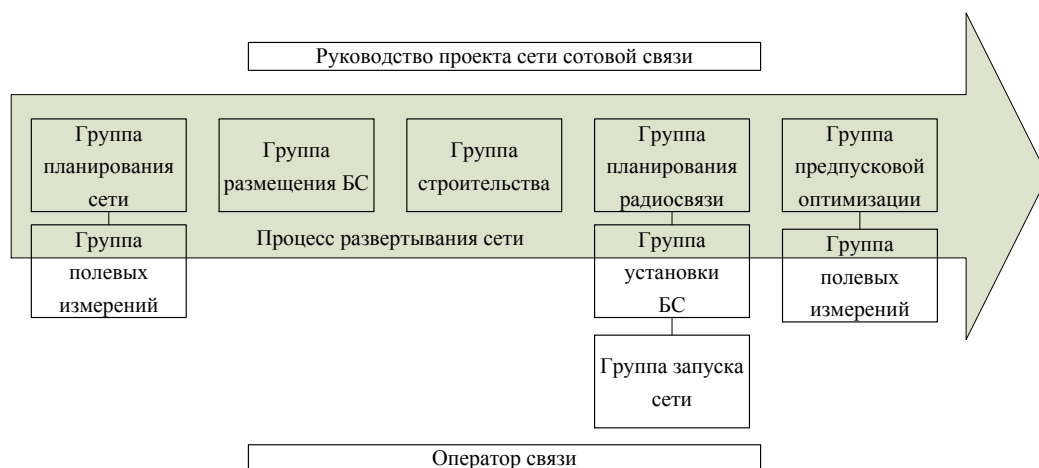


Рисунок 39 – Организация процесса проектирования сети

Данный процесс развертывания применяется как для отдельных базовых станций, так и для сети в целом. Из-за ограничений на длительность проекта, базовые станции должны управляться группами, но не все параметры базовых станций могут быть заданы сразу на этапе строительства. Для завершения проекта в разумные сроки, проектирование должно быть постепенным, поэтапным и с частичным перекрытием фаз и возвращением при необходимости на предыдущую. Руководство проекта сети заботится обо всей организации работ. Некоторые вспомогательные задачи, например, маркетинг, продажи, логистика и техническая поддержка, также являются частью проекта и не связаны конкретно с какой-либо группой.

Группа планирования сети отвечает за предпроектное планирование сети и фактическое планирование в рамках проекта, предоставляя возможные места установка БС в качестве результатов своей деятельности. Группа планирования сети взаимодействует с группой полевых измерений. Возможные места установки являются исходными данными для группы размещения БС, которая отвечает за поиск фактических местоположений БС. Эта группа проводит технический

мониторинг мест, выбирая из них наилучшие. Строительные работы выполняются группой строительства, и их целью является подготовка площадки для реализации телекоммуникационной сети. Месторасположение БС может варьироваться от размещения на существующих зданиях, до размещения на специально построенных вышках. Планирование радиосвязи охватывает установку, ввод в эксплуатацию и интеграцию БС. Установка – это настройка оборудования базовой станции, антенн и фидеров. Ввод в эксплуатацию означает функциональное тестирование автономных объектов сети. На этапе ввода в эксплуатацию также проверяется, что данные БС опираются на разработанный план сети, и, например, данные биллинга и маршрутизации соответствуют требованиям оператора. Фаза интеграции подтверждает, что БС функционирует как часть сети. После этого она готова для коммерческого использования. Отдельная группа оптимизации или группа планирования сети отвечают за фазу оптимизации перед запуском. Им оказывается помощь группой полевых измерений, и целью этой фазы является проверка функциональности сети. На нем необходимо установить, что настройки параметров в сети верны и что цели проектирования выполнены.

Автоматизация процесса проектирования радиосетей обеспечивает целый ряд преимуществ и выгодно отличается от описанного выше процесса. Результатом применения разработанного комплекса должен быть прозрачный, четко регламентированный, документированный и автоматизированный процесс проектирования. Прежде всего, можно выделить следующие достигнутые показатели:

- обеспечение стабильной повторяемости результатов с заданным качеством за счет стандартизации, модификации, регламентации и введения единообразного процесса проектирования;

- сокращение длительности циклов проектирования и уменьшения количества этих циклов – на выходе комплекса формируется оптимальный план сети;

- сокращение необходимого количества человек и рабочих групп, участвующих в проектировании – функции групп планирования сети, размещения БС, оптимизации и запуска сети выполняет разработанный автоматизированный программный комплекс под управлением одного или нескольких квалифицированных инженеров;

- повышение точности проектирования за счет применения методик, рекомендованных МСЭ;

- улучшение качества проектных разработок за счет применения методов многокритериальной оптимизации;

- снижение квалификационных требований к инженерам планирования;

- снижение трудоемкости расчетов за счет реализации сложного математического аппарата в виде подключаемых программных модулей для комплекса;

- сокращение сроков выполнения проектов – в зависимости от мощности использованного оборудования, составление оптимального плана составляет от 6 часов, вместо недель и месяцев «ручной» разработки и перерасчетов.

Для оценки количественной эффективности внедрения информационной системы управления проектами существует разработанный Институтом управления проектами (Пенсильвания, США) свод знаний по управлению проектами (Project Management Body of Knowledge, PMBoK) [86, 119]. Согласно этому документу, для проведения такой оценки используется метод функционально стоимостного анализа и модель оценки PMI (PM Value Model) [119]. В данном методе рассмотрение прироста эффективности процессов управления проектами происходит по следующим разделам: финансовые параметры, процедурные/организационные параметры, рост эффективности персонала.

Данные статистических исследований показывают, что прирост эффективности составляет при использовании ИСУП и САПР порядка 21% по отношению к показателям компаний, не использующих подобные системы. В

частности, эффективность использования ресурсов возрастает на 26.0%, управление рисками – на 19.0%, организация времени – на 27.5%.

Сравнение разработанного комплекса автоматизированного проектирования радиосетей с аналогичными затруднено, в связи с отсутствием отечественных и зарубежных аналогов, позволяющих проводить автоматизированную оптимизацию сети радиосвязи. Инновационной составляющей является то, что впервые предложен подход и методология полной автоматизации процесса планирования. Существующие комплексы позволяют только проводить расчет покрытия в соответствии с выбранной моделью распространения, места установка БС и их характеристики задаются пользователем, оптимальность полученного плана оценивается визуально по сформированной карте покрытия.

Для проверки эффективности разработанной методологии многокритериальной оптимизации была проведена серия синтетических тестов на трех видах территории (рис 40) без учета влияния рельефа поверхности (для уменьшения времени расчета), результаты сведены в таблицу 15



А – Воронежская область

Б – Камчатский край

В – Хабаровский край

Рисунок 40 – Тестовые территории

Таблица 15 – Результаты тестирования алгоритма

Территория	Модель сети (количество БС)	Эффективность (%)			Покрытие (%)	Количество поколений
		Минимальная	Средняя	Максимальная		
А	10	59	76	94	89	242
	20	62	78	92	92	264
	30	60	84	96	86	297
	50	63	81	100	96	330
	100	40	79	93	92	341
Б	10	74	59	89	91	286
	20	83	75	92	97	330
	30	87	51	96	96	330
	50	80	54	95	97	341
	100	82	62	95	92	319
В	10	51	68	82	80	286
	20	53	72	84	86	253
	30	48	73	81	86	297
	50	44	76	91	89	286
	100	27	70	83	83	352

Были использованы следующие настройки генетического алгоритма:

- Размер популяции: 50;
- Вероятность большой мутации: 0.15;
- Вероятность маленькой мутации: 0.5;
- Скорость закрепления: 0.5;
- Вероятность закрепления: 0.5;
- Циклов для закрепления: 2;
- Вид скрещивания: фиксированное;
- Селекция: турнирная.

Эффективность (минимальная, средняя или максимальная) представляет собой процент площади ячейки, выпадающей на область обслуживания. Покрытие отражает процент общего покрытия территории, обеспечиваемое

предлагаемой конфигурацией передатчиков. Для каждого теста в таблице 2 приведены минимальная, средняя и максимальная нагрузка на передатчик (выраженная в процентах от максимальной емкости) в лучшем случае (из пяти прогонов), а также процент планируемого покрытия.

Во всех тестовых случаях покрытие, достигнутое моделью, было в пределах 5-10% от запланированного уровня покрытия (90% территории). Эффективность соты в пределах 20-30% от общей емкости. Эти цифры соответствуют общепринятым стандартам проектирования радиосетей. Полный охват территории и максимальная эффективность сот не были достигнуты (за исключением единственного теста) из-за сложной топологии выбранных территорий.

При расчете тестовых проектов с использованием реальных данных, были получены следующие результаты затраченных ресурсов, необходимых для построения оптимальной сети радиосвязи (табл. 16):

Таблица 16 – Затраченные ресурсы

Проект	Количество запусков	Покрытие (усредненное)	Необходимый объем памяти	Минимальное время расчета	Максимальное время расчета
GSM-1800 Ростов-на-Дону	5	93%	3470МБ	11 ч. 36 мин.	12 ч. 48 мин.
LTE Воронежская обл.	10	97%	6897МБ	6ч. 05 мин.	6ч. 32 мин.

Среднее время разработки частотно-территориального плана, предлагаемого компаниями, занимающимися планированием радиосетей, составляет от 120 часов [50, 49, 51], таким образом, выигрыш от использования разработанной системы составит порядка 80% (с учетом времени, затраченного на анализ результатов).

Проведем анализ временной сложности разработанного алгоритма оптимального планирования сети радиосвязи. Наиболее «затратным» компонентом является вычисление генетических операторов и функции

приспособленности (включающей расчет покрытия). Временную сложность генетического алгоритма в целом можно представить в следующем виде:

$$O(N \cdot G \cdot O(\text{Fitness}) \cdot ((P_c \cdot O(\text{crossover})) + (P_m \cdot O(\text{mutation}) + O(\text{selection}))),$$

где P_c – вероятность кроссовера, P_m – вероятность мутации, N – размер популяции, G – число поколений,

Для турнирной селекции с сортировкой популяции сложность составит $O(N \log N)$, для кроссовера и мутации – $O(NL)$, где L – количество генов у особей.

Таким образом, окончательный вид при фиксированных вероятностях кроссовера и мутации будет таким:

$$O(N \cdot G \cdot O(F) \cdot (2O(NL) + O(\log N))),$$

что представляет собой линейно-логарифмическое время, что намного быстрее экспоненциального времени $O(F) \cdot 2^{O(n)}$, где n – число возможных мест для установки БС, необходимого для решения поставленной задачи с помощью динамического программирования. Время вычисления покрытия – $O(F)$ зависит от выбранных параметров проекта и одинаково в обоих подходах.

Так же одним из преимуществ использования эволюционного моделирования является предоставление ГА возможностей для реализации на архитектуре, допускающей параллельные процессы.

Далее, вычислим примерное время проведения расчетов, необходимого для составления приближенной к реальной ситуации оптимальной архитектуры системы. Первое, на что тратится большая часть времени – это вычисление целевой функции и, прежде всего, расчет зоны покрытия. Генетические операции, такие как селекция, скрещивание и мутация, могут считаться мгновенными и далее рассматриваться не будут. Таким образом, необходимо рассматривать функцию, вычисляющую радиопокрытие в отдельной ячейке, на которые разбита территория, в качестве единичной операции. Количество таких ячеек зависит от выбранных радиальных и угловых шагов для луча расчета. Необходимо учитывать, что это число может уменьшиться из-за препятствий на поверхности.

Число единичных операций для одного ресурса можно записать следующим образом:

$$N = \frac{2\pi}{s_r \times s_a} R,$$

где s_r – радиальный шаг, s_a – угловой, R – радиус расчета.

Приняв во внимание контекст генетического алгоритма, получим:

$$N_g = \sum_{i=1}^{\text{число поколений}} \left[\sum_{j=1}^{\text{число хромосом}} n_{ij} \frac{2\pi}{s_r \times s_a} R \right],$$

где n – количество размещаемых ресурсов.

Как мы видим, количество операций, которые необходимо сделать, прямо пропорционально радиусу расчета и обратно пропорционально выбранным шагам. Также, это число зависит от количества хромосом и поколений. Если мы хотим уменьшить время вычислений, то необходимо уменьшить число поколений, число хромосом, радиус или нам увеличить шаг сетки расчета. Каждая такая операция позволяет проводить операции быстрее, но оказывает отрицательное влияние на окончательное решение, поэтому необходимо найти компромисс между временем вычисления и оптимальностью получаемого в конце решения.

Проанализируем зависимость времени расчетов от размера выбранной области. Примем изначальный размер области за $n \times n$, а размер области, покрытой ресурсами за A , тогда число ресурсов при идеальных условиях распространения – $N = n_2 / A$. При увеличении области расчетов в l раз, количество ресурсов, необходимых для обеспечения такого же покрытия, увеличится в l^2 раз, соответственно так же возрастет количество одиночных операций. Время расчета новой зоны можно записать следующим образом:

$$T_2 = (L_2 / L_1)^2 \cdot T_1,$$

где T_1 – время, затраченной на расчет первоначальной зоны, L_1 – сторона первоначальной зоны, L_2 – сторона новой зоны.

Таким образом, время расчетов при увеличении размера выбранной области растет квадратично, что показано на рисунке 41. Для расчетов использовался четырехядерный процессор Intel CPU Core i7 3.4 GHz.

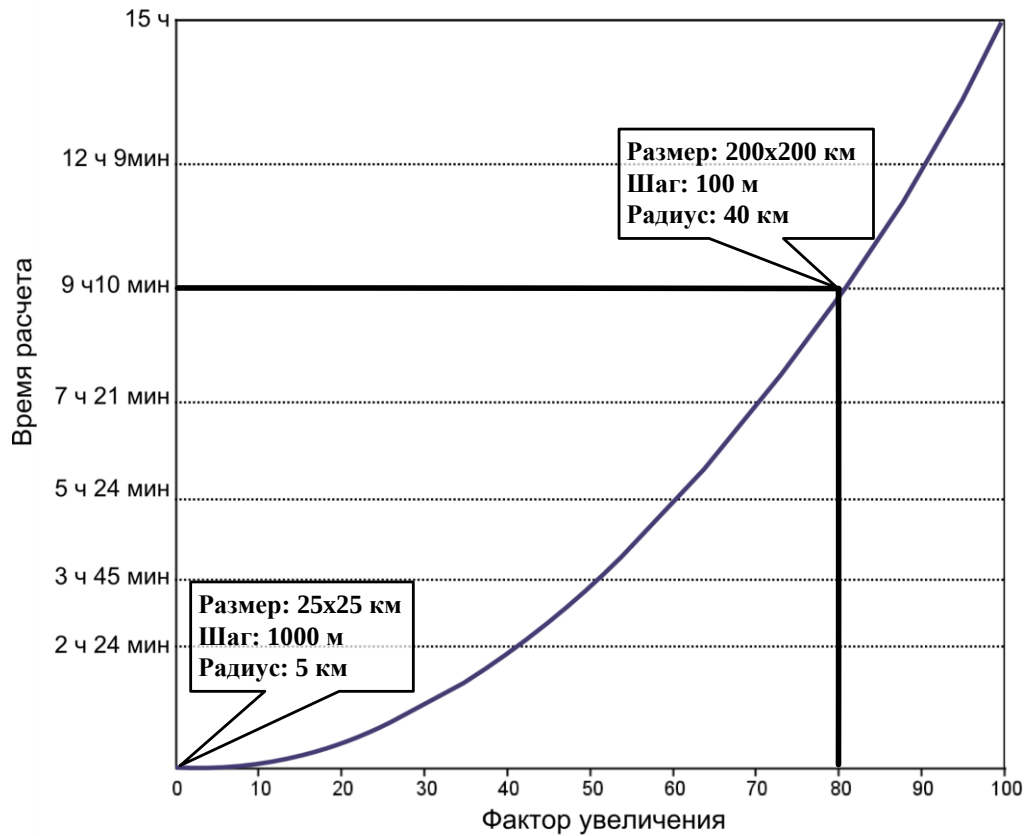


Рисунок 41 – Время расчета проекта

Сходимость решения зависит от используемой конфигурации параметров систем. На рисунке 42 показан график зависимости значения функции пригодности от числа поколений для различных вариантов системы.

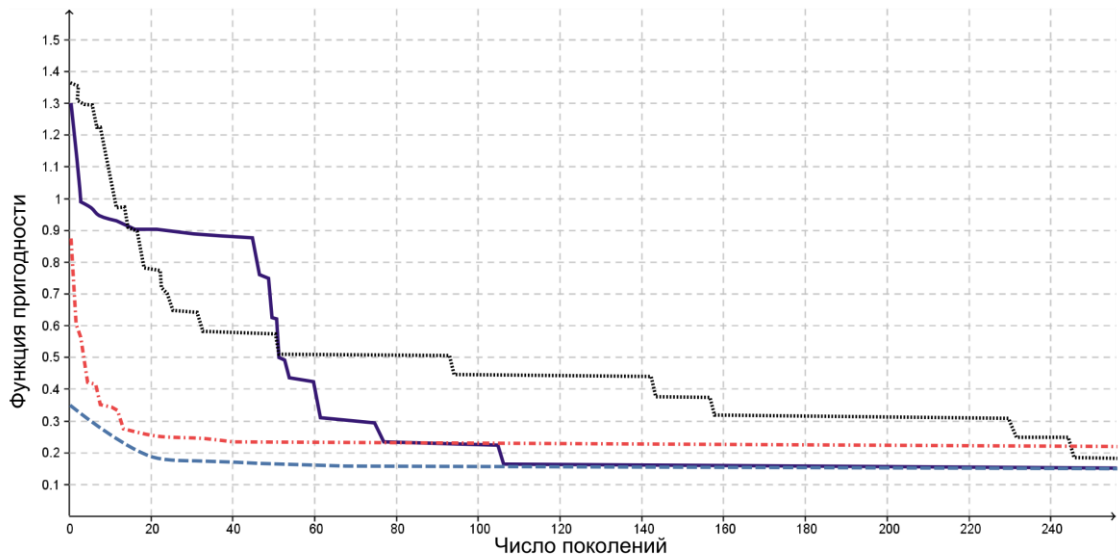


Рисунок 42 – Сходимость решений

По нему можно увидеть, что отдельные решения сильно отличаются друг от друга: некоторые сходятся очень рано, некоторые не сходятся в течение первых 100 поколений. Можно утверждать, что каждая популяция достигает одинокого конечного результата – оптимального решения, но некоторые достигают его раньше других, они являются лучшими и позволяют сократить общее время расчетов. В симуляции было проведено 500 поколений и графики показывают, что худшими популяциями оптимум был достигнут уже на 250 шаге. Таким образом, отбирая лучшие варианты, время получения оптимального решения можно сократить вдвое.

ВЫВОДЫ

Изложенные в главе теоретические положения позволили разработать математико-инструментальные средства, применимые при планировании различных радиосетей. С применением структурно-функциональной технологии системного программирования эти средства реализованы в виде программного комплекса, позволяющего инженерам планирования:

- проводить планирование и оптимизацию новых и модернизацию и модификацию существующих сетей радиосвязи различных стандартов;
- составлять частотно-территориальные планы, включающие картографические данные и отчеты по энергетическим характеристикам для проектируемых сетей;
- использовать полный спектр возможностей ГИС технологий, включающий построение профилей высот, диаграмм направленности и полей напряженности электромагнитного сигнала.

Разработанные математико-инструментальные средства отличаются от существующих комплексов подобного типа тем, что позволяют обеспечить полную автоматизацию процесса проектирования.

Данный программный комплекс прошел апробацию и внедрён в ЦСИР АО «НТЦ РЭБ», для использования в составе разрабатываемых комплексов в качестве подсистемы планирования радиосвязи.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что применение разработанного программного комплекса является крайне эффективным, так как позволяет не только автоматизировать процесс проектирования радиосети, но и снизить риски принятия неверного решения инженером планирования.

Проведенные анализы эффективности показали, что разработанная методология обладает большой гибкостью и пригодна для решения сложных оптимизационных задач.

Решение поставленной задачи с помощью эволюционного моделирования показало хорошие результаты: генетический алгоритм легко прошел адаптацию к задаче. Методология доказала свою ценность, поскольку во всех тестовых случаях она всегда сходилась к оптимальному решению. Необходимо отметить, что качество решения зависит от вариантов архитектуры системы и использованных параметров алгоритма, но лучшие решения требуют большого времени на его поиск, так что необходим компромисс между оптимальностью полученного решения и временем вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была реализована задача выбора оптимальных проектных вариантов сетей радиосвязи на этапе ее планирования с учетом совокупности показателей качества. Отличительной особенностью является формализованный учет совокупности технических и экономических требований на всех этапах проектирования, что дает возможность отыскивать оптимальные по Парето проектные решения, отражающие лучшие варианты построения сети по совокупности показателей качества. Такой подход позволяет исключить безусловно худшие варианты и сокращает количество перепланирований сети на этапе ее эксплуатации.

Итогом диссертационного исследования стала разработка программного комплекса, реализующего предложенную схему поиска оптимального решения и обеспечивающего автоматизацию процесса проектирования различных видов радиосетей.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Предложены методы многокритериальной оптимизации, основанные на оптимальности по Парето, для решения проблем краткосрочного и долгосрочного планирования и проектирования телекоммуникационных сетей различных типов.
2. Составлена методология автоматизации проектирования сети радиосвязи, позволяющая проводить расчеты по выбранной области в автоматическом режиме.
3. Синтезирован гибридный алгоритм поиска оптимального решения, основанный на применении методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий.
4. Разработан математический аппарат и инструментальные средства в виде программного комплекса автоматизации процесса проектирования, особенностью которого является использование разработанных методик, что позволяет находить более точные решения прикладных задач за ограниченное время.
5. Проведены исследования эффективности разработанных методик: при решении задач, возникающих при планировании сетей, с помощью комплекса

автоматизированного планирования достигается сокращение времени разработки плана сети на 80%, а так же эффективность использования ресурсов возрастает на 26%, управление рисками – на 19%.

6. Компоненты программного комплекса прошли государственную регистрацию в ФГАНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти».

7. Программный комплекс внедрён ЦСИР АО «НТЦ РЭБ», для использования в составе разрабатываемых комплексов в качестве подсистемы планирования радиосвязи.

Список литературы

1. Абилов А. Распространение радиоволн в сетях подвижной связи / А. Абилов. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2001. – 24 с.
2. Айвазян С.А. Теория вероятностей и прикладная статистика / С.А. Айвазян, В.С. Мхиторян. – М.: Юнити-Дана, 2001. – 656 с.
3. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А.Е. Алтунин, Семухин М. В. – Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. – 352 с.
4. Аттетков А.В. Введение в методы оптимизации / А.В. Аттетков, В.С. Зарубин, А.Н. Канатников. – М.: Финансы и статистика, 2008. – 272 с.
5. Бабков В. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование / В. Бабков, М. Вознюк, П. Михайлов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 226 с.
6. Бабков В. Сотовые системы мобильной радиосвязи: учеб. пособие / В. Бабков, И. Цинкин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 432 с.
7. Бабков В. Сотовые системы мобильной радиосвязи: Учеб. пособие / В. Бабков, И. Цинкин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 432 с.
8. Безрук В.М. Современные технологии автоматизации планирования сетей радиосвязи / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва, А.В. Анищенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №2 (31). – С.32–36.
9. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи / А.Н. Берлин. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
10. Билоус Ю.В. Методы территориально-частотного планирования сотовых систем подвижной радиосвязи и анализ их эффективности: дис. к.т.н. / Ю.В. Билоус. – Харьков: ХНУРЕ, 2003. – 211 с.
11. Брахтман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике / Т.Р. Брахтман. – М.: Сов. радио, 1984. – 326 с.
12. Быховский М.А. Исследование эффективности сотовых систем сухопутной подвижной связи с кодовым разделением каналов / М.А. Быховский // Электросвязь. – 1995. – С.29–33.

13. Быховский М.А. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / М.А. Быховский. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 376 с.
14. Быховский М.А. Частотное планирование сотовых сетей подвижной радиосвязи / М.А. Быховский // Электросвязь. – 1993. – №8. – С.30–32.
15. В.Д. Ногин. Принятие решений при многих критериях / В.Д. Ногин. – СПб.: Издательство «ЮТАС», 2007. – 104 с.
16. Васильев Ф. Методы оптимизации / Ф. Васильев. – М.: Факториал пресс, 2002. – 824 с.
17. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю.А. Громаков. – М: Эко-Трендз, 1997. – 237 с.
18. Гуреев А. Компьютерное моделирование беспроводных сетей и проблемы их электромагнитной совместимости / А. Гуреев, В. Кустов // Исследовано в России. – 2002. – №124. – С.1505–1516.
19. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств / Л.С. Гуткин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
20. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: учеб, пособ. для вузов / Л.С. Гуткин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
21. Дубов Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
22. Емельянов А.К. Оценка эффективности проектов развития инфраструктуры сетей сотовой связи / А.К. Емельянов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №5.
23. Емельянов В.В. Системы сотовой подвижной радиосвязи: Монография / В.В. Емельянов. – Харьков: Торсинг, 2007. – 300 с.
24. Емельянов В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 431 с.
25. Золотарев А. Методы оптимизации распределительных процессов / А. Золотарев: ЛитРес, 2014.

26. Карташевский В.Г. Сети подвижной связи / В.Г. Карташевский, С.Н. Семенов, Т.В. Фирстова. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 300 с.
27. Концепция развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года. – М.: ГКРЧ, 2017.
28. Корнилов А. Система планирования радиосвязи на базе цифровых карт местности / А. Корнилов, А. Архипкин, А. Кириленко // БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. – 2007. – №2. – С.48–51.
29. Котенко В.В. Теория информации и защита телекоммуникаций: монография / В.В. Котенко, К.Е. Румянцев. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2009. – 369 с.
30. Кшиштов В. Системы подвижной радиосвязи / В. Кшиштов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2006. – 154 с.
31. Локшин М.Г. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания / М.Г. Локшин, А.А. Шур, А.В. Кокарев, Р.А. Краснощеков. – М.: Радио и связь, 1988. – 144 с.
32. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений: учебное пособие / А.В. Лотов, И.И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
33. Методика определения ожидаемой дальности УКВ радиосвязи с подвижными объектами. – М.: Минстрой СССР. ЦБТИ, 1971. – 56 с.
34. Михалевич В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевич. – М.: Наука, 1982. – 287 с.
35. Многокритериальные задачи принятия решений / ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянов. – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
36. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1971. – 424 с.
37. Назаров А.Н. Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров сетей АТМ / А.Н. Назаров. – М.: Горячая линия - Телеком, 2002. – 256 с.
38. Нейман В.И. Сотовая система подвижной радиосвязи / В.И. Нейман. – М.: МИИТ, 1996. – 46 с.

39. Никодимов И.Ю. Планирование сети GSM / И.Ю. Никодимов, М.И. Мансырев // Сети и системы связи. – 1999. – №13.
40. Никодимов И.Ю. Планирование сети GSM / И.Ю. Никодимов, М.И. Мансырев, С.И. Пономарев, А.В. Троц // Электросвязь. – 200. – №3.
41. Ногин В.Д. Основы теории оптимизации / В.Д. Ногин, И.О. Протождьяконов, И.И. Евлампиев. – М.: Высшая школа, 1986. – 379 с.
42. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.
43. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях / В.Д. Ногин // СПб: Изд-во Ютас. – 2007. – .
44. Овездельгиев А.О. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации / А.О. Овездельгиев, Э.Г. Петров, К.Е. Петров. – Киев: Наукова думка, 2002. – 163 с.
45. Одоевский С. Программные средства планирования и оптимизации сетей беспроводной связи / С. Одоевский, В.А. Степанец // Первая миля. – 2010. – №2. – С.28–31.
46. Официальный сайт компании Forsk [сайт]. URL: <http://www.forsk.com/> (дата обращения: 23.08.2016).
47. Официальный сайт компании ИнфоТел [сайт]. URL: <http://www.rpls.ru/> (дата обращения: 23.08.2016).
48. Официальный сайт НИИР-ЛОНИИР [сайт]. URL: <http://www.loniir.ru/>.
49. Официальный сайт ООО «ТелекомКонсалтинг» [сайт]. URL: <https://telekom.org.ru> (дата обращения: 18.01.2018).
50. Официальный сайт ООО «Телекомстартап» [сайт]. URL: <http://telecomstartup.ru/> (дата обращения: 18.01.2018).
51. Официальный сайт ООО «Центр телекоммуникационных технологий» [сайт]. URL: <https://www.ctt-group.ru/> (дата обращения: 18.01.2018).
52. Перепелица В.А. Многокритериальные задачи теории графов. Алгоритмический подход / В.А. Перепелица. – Киев: УМК ВО, 1989. – 68 с.

53. Печаткин А.В. Системы мобильной связи. Часть 1 / А.В. Печаткин. – Рыбинск: РГАТА, 2008. – 121 с.
54. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
55. Полушин П. Избыточность сигналов в радиосвязи / П. Полушин, А. Самойлов. – М.: Радиотехника, 2007. – 256 с.
56. Попов В.И. Алгоритм первичного этапа проектирования сотовой сети мобильной связи / В.И. Попов. – Белгород: БелГУ, 2007. – 10 с.
57. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И. Попов. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
58. Потапов Ю. Программное обеспечение для планирования радиосетей / Ю. Потапов // EDA EXPERT. – 2002. – №10 (73).
59. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / М.В. Ратынский. – М.: Радио и связь, 1998. – 248 с.
60. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 348 с.
61. Рожновский М.В. Обобщенная функциональная схема программного комплекса планирования сетей беспроводной связи / М.В. Рожновский // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – №1. – С.209–212.
62. Саати Т.Л. Аналитическое планирование. Организация систем / Т.Л. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
63. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях / Т.Л. Саати. – Москва: URSS, 2010. – 357 р.
64. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
65. Самойлов А. Формирование радиосигналов: концепции, методы, устройства / А. Самойлов, С. Самойлов. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 345 с.

66. Системы подвижной радиосвязи / ред. И. М. Пышкин. – М.: Радио и связь, 1986. – 328 с.

67. Сковпин М.С. Radio Network Planning Management on the Basis of Multiobjective Choice Models / М.С. Сковпин // Актуальные проблемы профессионального образования: подходы и перспективы: Материалы XI-ой международной, научно–практической конференции. – Воронеж: ВИБТ, 2013. – С.481–483.

68. Сковпин М.С. Автоматизация проектирования телекоммуникационных сетей / М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Инновационные технологии в науке и образовании. – 2015. – №4. – С.315–320.

69. Сковпин М.С. Автоматизация процесса оптимального проектирования сетей радиосвязи / М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина, Н.С. Сковпин // Научные исследования: теория, методика и практика: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 27 авг. 2017 г.) / ред. О. Н. Широков. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. – С.241–249.

70. Сковпин М.С. Взаимодействие вычислительного кластера и метода принятия решений / М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Actualscience. – 2016. – Т.2, №5. – С.50–51.

71. Сковпин М.С. Метод анализа иерархий в сложных информационных системах / М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2015. – С.10–15.

72. Сковпин М.С. Многокритериальный подход к автоматизации проектирования радиосетей / М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2016: Сборник трудов / ред. А. Л. Стемпковский. – М.: ИППМ РАН, 2016. – С.252–259.

73. Сковпин М.С. Обработка больших объемов данных для принятия управленческих решений / М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Интеллектуальные информационные системы: Труды Всероссийской конференции: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – С.220–223.

74. Сковпин М.С. Оптимальное планирование телекоммуникационных сетей на основе моделей многокритериального выбора / М.С. Сковпин // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики: Материалы 4-й научно-практической internet- конференции. – Ульяновск: SIMJET, 2014. – С.24–29.

75. Сковпин М.С. Планирование и оптимизация сетей сотовой связи / М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т.9, №6-3. – С.81–84.

76. Сковпин М.С. Применение метаэвристик для автоматизации задач проектирования телекоммуникационных сетей / М.С. Сковпин // Моделирование систем и процессов. – 2014. – №3. – С.32–36.

77. Сковпин М.С. Применение метода анализа иерархий при принятии управленческих решений / М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2015. – С.99–102.

78. Сковпин М.С. Применение моделей многокритериального выбора при планировании телекоммуникационных сетей / М.С. Сковпин // Радиолокация, радионавигация, связь: Материалы XX Международной НТК (RLNC-2014). – Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2014. – С.834–839.

79. Сковпин М.С. Применение моделей многокритериальной оптимизации для автоматизации проектирования телекоммуникационных сетей / М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Моделирование систем и процессов. – 2015. – №4. – С.64–70.

80. Сковпин М.С. Разработка системы автоматизированного проектирования радиосетей на основе моделей многокритериального выбора / М.С. Сковпин // Инновационные технологии на базе фундаментальных научных разработок – прорыв в будущее: Сборник докладов. – Воронеж: Воронежский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго РФ, 2014. – С.51–53.

81. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – Москва: Дрофа, 2006. – 175 с.

82. Сорокин А.С. Сотовые системы радиосвязи. Курсовое и дипломное проектирование. Учебное пособие / А.С. Сорокин. – М.: МТУСИ, 2006. – 31 с.
83. Справочник по управлению использованием спектра на национальном уровне. – Женева: Бюро радиосвязи, МСЭ, 2005.
84. Статников Р. Многокритериальное проектирование машин / Р. Статников, И. Матусов. – М.: Знание, 1989. – 48 с.
85. Степанец В.А. Программный комплекс ONEPLAN RPLS-DB планирования и оптимизации сетей подвижной и фиксированной связи / В.А. Степанец. – СПб.: ИнфоТел, 2012. – 45 с.
86. Сурыгина И.Ю. Эффективность использования информационных систем управления бизнес-проектами / И.Ю. Сурыгина // Сервис в России и за рубежом. – 2008. – Т.3. – С.66–76.
87. Тихвинский В. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура / В. Тихвинский, С. Терентьев, А. Юрчук: Эко-Трендз, 2010. – 283 с.
88. Тихвинский В.О. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев. – М.: ЭкоТрендз, 2007. – 400 с.
89. Хейл У.К. Присвоение частот: теория и приложения / У.К. Хейл // ТИИЭР. – 1980. – Т.68, №12. – С.55–76.
90. Цимбал В. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход. Монография. / В. Цимбал. – М.: Вузовская книга, 2014. – 114 с.
91. Цимбал В. Математическое моделирование процесса установления соединения в сети сотовой связи GSM / В. Цимбал, А. Васильченко, А. Кочуров // Известия Института инженерной физики. – 2015. – Т.37, №3. – С.16–22.
92. Чеботарева Д.В. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи / Д.В. Чеботарева, В.М. Безрук, 2013. – 147 с.
93. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.

94. Blaunstein N. Radio propagation in cellular networks / N. Blaunstein. – Boston: Artech House, 2000. – 386 c.
95. Braithwaite C. UMTS network planning and development / C. Braithwaite, M. Scott. – Amsterdam, Boston: Newnes, 2004. – 313 p.
96. Chevallier C. WCDMA (UMTS) deployment handbook / C. Chevallier. – Chichester West Sussex England, Hoboken NJ: John Wiley & Sons, 2006. – 387 p.
97. COST Action 231: Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems / ed. D. Eraldo, C. M. Luis. – Brussels: European Commission, 1999. – 474 p.
98. Doner J. R. A method for frequency allocation and assignment in wireless communication systems / J.R. Doner: Google Patents, 1997. – . URL: <https://google.com/patents/WO1997014259A1?cl=ko>.
99. Dyer R.F. Group decision support with the Analytic Hierarchy Process / R.F. Dyer, E.H. Forman // Decision Support Systems. – 1992. – Vol. 8, №2. – P.99–124.
100. Fischer L. G., et al. System and method for transmitting data / L.G. Fischer, W.C. Hamer, S.H. Phillips: Google Patents, 2000. – . URL: <https://www.google.com/patents/US6353728>.
101. Fundamentals of cellular network planning and optimisation / ed. A. R. Mishra. – Chichester: Wiley, 2004. – 286 p.
102. Garg V.K. IS-95 CDMA and cdma2000 / V.K. Garg. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2000. – xxii, 423.
103. Garg V.K. Wireless communications and networking / V.K. Garg. – Amsterdam, Boston: Elsevier Morgan Kaufmann, 2007. – 1 online resource (xxvii, 821).
104. Gilbert M. M., et al. Apparatus and method for dynamic resource allocation in a network environment: US Patent 6771595 B1 / M.M. Gilbert, D.D. Boom: Google Patents, 2004. – №US 6771595 B1. URL: <http://www.google.com/patents/US6771595>.
105. Hartman P. A. Cellular frequency reuse cell plan / P.A. Hartman: Google Patents, 1993. – . URL: <http://www.google.com/patents/US5247699>.
106. Korhonen J. Introduction to 3G mobile communications / J. Korhonen. – Boston, MA: Artech House, 2003. – 1 online resource (xviii, 544).

107. Lane N. 3G network planning / N. Lane. – London: Baskerville, 2003.
108. Lee W.C.Y. Elements of cellular mobile radio systems / W.C.Y. Lee // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1986. – T.35, №2. – C.48–56.
109. Lee W.C.Y. Wireless and cellular telecommunications / W.C.Y. Lee. – New York, NY: McGraw-Hill, 2006. – 821 p.
110. Leung K. K., et al. Method and apparatus for a high-capacity cellular network by improved sectorization and interleaved channel assignment / K.K. Leung, L.C. Wang: Google Patents, 2001. – . URL: <http://www.google.co.in/patents/US6580912>.
111. Leung K. K., et al. Method and apparatus for a high-capacity cellular network by improved sectorization and interleaved channel assignment / K.K. Leung, L.C. Wang: Google Patents, 2003. – . URL: <http://www.google.co.in/patents/US6580912>.
112. Mark J.W. Power control and rate allocation in multirate wideband CDMA systems / J.W. Mark, S. Zhu // Wireless Communications and Networking Conference. – 2000. – Vol. 1. – P.168–172.
113. Meidan R. Method and apparatus for dynamic distribution of a communication channel load in a cellular radio communication system: US Patent 5276907 / R. Meidan: Google Patents, 1994. – . URL: <http://www.google.com/patents/US5276907>.
114. Methods of Multicriteria Optimization in Telecommunication Networks Planning and Controlling / ed. V. Bezruk, I. Svid, I. Korsun, 2006. – 381-383.
115. Mishra A.R. Advanced cellular network planning and optimisation / A.R. Mishra. – Chichester: John Wiley, 2007. – 521 p.
116. Mishra A.R. Handbook of end-to-end cellular network planning and optimisation / A.R. Mishra. – New York: Wiley, 2006.
117. Parsons J.D. The mobile radio propagation channel / J.D. Parsons. – Chichester: John Wiley, 2000. – 418 p.

118. Perez-Fontan F. Educational cellular radio network planning software tool / F. Perez-Fontan, J. Rabanos // IEEE Transactions on Education. – 1998. – T.41, №3. – C.203–215.
119. Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide) / Project Management Institute. – Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017. – 592 p.
120. Rappaport T.S. Wireless communications / T.S. Rappaport. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 2002. – 707 p.
121. Rayat N. A Review on Cellular Deployment / N. Rayat // Educon 2009. – 2009. – C.130–136.
122. Recommendation ITU-R P.1546 : Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz: International Telecommunication Union, 2013. – 53 p.
123. Recommendation ITU-R SM.1537-1. Automation and integration of spectrum monitoring systems with automated spectrum management. – Geneva: International Telecommunication Union, 2013. – 18 p.
124. Recommendation ITU-R V. 662-3. Terms and definitions: International Telecommunication Union, 2000. – 20 p.
125. Report ITU-R SM.2153-6. Technical and operating parameters and spectrum requirements for short-range radiocommunication devices. – Geneva: International Telecommunication Union, 2017. – 135 p.
126. Rha P. S., et al. Cellular system having frequency plan and cell layout with reduced co-channel interference / P.S. Rha, S.E. Kay, A.J. Macdonald: Google Patents, 1994. – . URL: <http://www.google.com/patents/US5365571>.
127. Rumney M. LTE and the evolution to 4G wireless / M. Rumney. – Chichester: John Wiley, 2013. – 626 p.
128. Sean Luke. Essentials of Metaheuristics / Sean Luke: Lulu, 2013.
129. Seybold J.S. Introduction to RF propagation / J.S. Seybold. – Hoboken, N.J.: Wiley, 2005. – 330 c.

130. Shengwu X. Parallel strength Pareto multiobjective evolutionary algorithm / X. Shengwu, L. Feng: Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 2003. PDCAT'2003. Proceedings of the Fourth International Conference on, 2003. – C.681–683.
131. Smith J. M., et al. High capacity sectorized cellular communication system / J.M. Smith, J.F. Long, R.J. Wanat, A. Kobrinetz: Google Patents, 1995. – . URL: <https://www.google.com/patents/US5432780>.
132. Song L. Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE / L. Song, J. Shen. – Boca Raton FL: CRC Press, 2011. – ix, 619.
133. Syberfeldt A. A multi-objective evolutionary approach to simulation-based optimisation of real-world problems [electronic resource] / A. Syberfeldt, 2009.
134. Wong K.D. Fundamentals of wireless communication engineering technologies / K.D. Wong. – Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2012. – xxii, 540.
135. Yu C.C. Cellular mobile radio networks design / C.C. Yu, Y.C. Chi, C. Ching, Y.T. Guang: E -Business and E -Government (ICEE), 2011 International Conference on, 2011. – C.1–4.
136. Zhang X. LTE optimization engineering handbook / X. Zhang. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2018. – 827 p.

Приложение П1. Акт внедрения (ЦСИР АО «НТЦ РЭБ»)

УТВЕРЖДАЮ

Директор Центра системных исследований и разработок – филиал АО «Научно-технический центр РЭБ» кандидат технических наук, доцент

А.А. Болкунов

19 февраля 2018 года

АКТ

внедрения результатов научной работы Сковпина М.С.
«Многокритериальная оптимизация автоматизации частотно-территориального планирования сетей сотовой связи»

Комиссия в составе: председателя – главного инженера ЦСИР к.т.н., доцента Булычева О.А., членов комиссии – ведущего научного сотрудника к.т.н., доцента Юшинина С.Ю. и начальника отдела к.т.н., с.н.с. Юзвенко С.В., составила настоящий акт о том, что результаты научной работы Сковпина М.С. «Многокритериальная оптимизация автоматизации частотно-территориального планирования сетей сотовой связи», в части касающейся:

– алгоритмических средств поддержки принятия решений, адаптированных для использования в методах эволюционного моделирования, соответствующих рекомендациям Международного Союза Электросвязи, включающих модели распространения радиосигналов и определения зоны прямой видимости, а так же методику расчета зон покрытия;

– автоматизированной методики поиска оптимального решения задачи планирования сети радиосвязи, позволяющей повысить эффективность планирования и снизить временную сложность применяемых алгоритмов,

использованы при выполнении ОКР «Полянка-РЭБ» (государственный контракт от 31 мая 2017 г. № 1719187343511452467001782).

Председатель комиссии:

Главный инженер ЦСИР к.т.н., доцент

Булычев О.А.

Члены комиссии:

Ведущий научный сотрудник к.т.н., доцент

Юшинин С.Ю.

Начальник отдела к.т.н., с.н.с.

Юзвенко С.В.

**Приложение П2. Акт внедрения в учебный процесс (ФГБОУ ВО
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова)**

“УТВЕРЖДАЮ”
Директор филиала
ФГБОУ ВО ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова
Сухов / В.Е. Сухова
“12” февраля 2018 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Сковпина Михаила Сергеевича “ Многокритериальная оптимизация
автоматизации частотно-территориального планирования сетей сотовой
связи ” в учебный процесс ФГБОУ ВО ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова.

Настоящий акт составлен в том, что на основании исследований,
проведенных автором, получены и используются в учебном процессе
следующие результаты:

– алгоритмические средства поддержки принятия решений,
адаптированные для использования в методах эволюционного
моделирования.

– методика поиска оптимального решения для задачи планирования,
основанная на применении методик многокритериальной оптимизации,
эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, учитывающая
противоречивые требования, возникающие в процессе планирования;

Результаты научной работы используются для обучения студентов по
дисциплинам: “Моделирование процессов и систем”, “Интеллектуальные
системы и технологии”, “Дополнительные главы математики” а также при
написании курсовых проектов и выпускных квалификационных работ для
направления подготовки “Информационные системы и технологии”
(09.03.02).

Протокол № 11 заседания кафедры Математики, информационных систем и
технологий от “9” февраля 2018 г.

Зав. кафедрой
математики, информационных систем
и технологий
“9” февраля 2018 г.



Зайцева Т.В.

Начальник отдела кадров

“12” февраля 2018 г.



Андреещев А.А.

Приложение ПЗ. Свидетельство на программу для ЭВМ

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный технический
университет»

Воронежский областной центр
новых информационных технологий

CNIT

394026, Воронеж,
Московский проспект, 14,

ОЦ НИТ

тел. (473) 271-85-49

факс (473) 277-92-12

E-mail – yurasov@vorstu.ru

19.11.2015 № 0449/0-384

На № _____

Настоящим удостоверяется, что «Система автоматизированного проектирования радиосетей на основе моделей многокритериального выбора», разработанная в ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет» (авторы – Сковпин М.С., Лапшина М.Л., научный руководитель – профессор Лапшина М.Л.), зарегистрирована в государственном информационном фонде неопубликованных документов ФГАНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти» (№ 50201550514 от 05.11.2015).

Директор ОЦНИТ ФГБОУ ВПО «ВГТУ» _____



В.Г. Юрасов