

Московский Технический Университет Связи и Информатики

На правах рукописи

Токарь Роман Сергеевич

**Разработка и исследование алгоритма автоматизированного
проектирования сотовых сетей связи**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: **Бонч-Бруевич А.М.**

Москва – 2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
Введение.....	4
Глава 1.....	10
1.1. Анализ проблем частотно-территориального планирования сетей подвижной радиосвязи.....	10
1.2. Проблемы роста сети.....	11
1.3. Существующее программное обеспечение и методы его использования.....	13
1.4. Анализ традиционного процесса частотно-территориального планирования.....	19
1.5. Анализ способов совершенствования традиционного подхода к частотно-территориальному планированию.....	25
Глава 2.....	29
2.1. Алгоритм оптимизации.....	29
2.1.1. Критерий оптимальности.....	29
2.1.2. Формирование исходного множества.....	32
2.1.2.1. Потенциальные места установки базовых станций	32
2.1.2.2. Элементы исходного множества.....	33
2.1.3. Существенные свойства оптимальной сети.....	35
2.1.4. Алгоритм синтеза оптимальной сети.....	36
2.1.4.1. Веса элементов сети.....	36
2.1.4.2. Построение определимого множества.....	46
2.1.4.3. Выделение ядра.....	47
2.2. Синтез оптимальной сети связи.....	47
2.2.1. Этап I: отыскание определимого множества N_+	47
2.2.2. Этап II: выделение \oplus -ядра минимальной мощности из определимого множества N_+	59
2.3. Анализ разработанного алгоритма	63

Глава 3	69
3.1. Исходные данные	69
3.1.1. Территория обслуживания и качество предоставления услуг.....	69
3.1.2. Частотный ресурс.....	70
3.1.3. Множество базовых станций.....	70
3.1.4. Секторизация БС и существенные характеристики.....	72
3.1.5. Зоны покрытия.....	72
3.1.6. Трафик.....	73
3.2. Синтез оптимальной сети.....	73
3.2.1. Этап I.....	73
3.2.2. Этап II.....	77
3.3. Применение алгоритма.....	80
3.3.1. Построение одноуровневой сети.....	80
3.3.2. Построение иерархической сети.....	85
3.3.3. Интеграция новой БС в существующую сеть.....	96
3.3.4. Проект развертывания сети 4-го поколения McWiLL.....	105
Глава 4	111
4.1. Модель следящей системы.....	111
4.2. Общая схема «непрерывного» процесса оптимизации сети.....	114
4.3. Реализация процесса на примере сети для г. Костромы.....	117
Заключение	121
Список иллюстративного материала	123
Список литературы	126
Приложение	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Современные телекоммуникации являются важной частью инфраструктуры общества и обеспечивают его транспортными линиями для передачи различных видов информации.

При анализе статистических данных, полученных при эксплуатации сетей связи, была выявлена информационно-экономическая закономерность [1]:

$$I = a * G,$$

где I – количество информации, порождаемой обществом;

G – валовой национальный продукт;

a – некоторый коэффициент.

Это объясняется тем, что социально-экономическое развитие общества приводит к увеличению объема производимой обществом информации, и, как следствие, увеличивается объем информации, передаваемой по сетям связи.

На сегодняшний день абонентская база в мировом масштабе составляет уже более миллиарда абонентов, при этом темпы ее роста лишь увеличивается. Чтобы оценить скорость роста, достаточно представить, что каждые две секунды абонентская база увеличивается более чем на два абонента.

Высоким темпам развития подвижной связи, помимо прочих, способствуют растущие потребности общества и конкуренция между компаниями операторами сетей связи.

Одна из главных проблем, характерных для России – недостаточность «кондиционного» частотного ресурса, который можно использовать без существенных ограничений на частотные, пространственные и энергетические параметры оборудования в диапазонах частот 400, 800, 900, 1800 МГц и 2 ГГц.

Кроме того, к проблемам использования радиочастотного спектра можно отнести:

- неравномерную загрузку радиочастотного спектра (РЧС) средствами различного назначения;
- устаревший парк радиоэлектронных средств с высоким уровнем

внеполосных и побочных излучений;

- неэффективные технологии использования РЧС;
- необходимость высвобождения РЧС от устаревших радиоэлектронных средств для развития перспективных систем.

Диапазон 900 МГц, наиболее востребованный в системах сотовой подвижной связи, является самым проблемным с точки зрения правовых и технических аспектов использования, поскольку используется для правительственной связи, воздушной радионавигации, спутниковой связи, для средств космической эксплуатации и исследований, систем ближней навигации и посадки.

При этом высвобождение радиочастотных средств является очень сложным процессом организационно-правовых и технико-экономических мер. И что немаловажно, этот процесс требует колоссальных финансовых затрат.

В таких условиях перед компаниями-операторами сетей сотовой подвижной радиосвязи остро встает вопрос о возможностях и способах эффективной модернизации и развития своих сетей.

К настоящему времени разработаны и широко используются многочисленные программные средства, позволяющие проектировать сети связи, оптимизировать частотно-территориальные планы, визуализировать покрытие сетей и проблемные места с интерференцией, отслеживать информацию о качестве функционирования сетей.

Анализ возможностей таких средств и методик их применения выявил следующее:

- все упомянутые средства не могут ответить на вопрос, что делать с сетью при меняющейся нагрузке. Вопрос решается экспертным путем и не дает гарантий оптимального решения;
- «последовательный» характер использования программных средств не позволяет решать проблему одновременно с учетом всех ограничений, что дает неоптимальный результат;

- экспоненциальный рост сложности вычислительных алгоритмов, используемых в существующих программных средствах, приводит к тому, что сеть рассматривается не целиком, а фрагментами, что в большинстве случаев снижает эффективность решения.

Таким образом, разработка алгоритма поиска оптимальной топологии сети радиодоступа, имеющего приемлемую вычислительную сложность и позволяющего учитывать множество ограничивающих факторов, является одной из актуальных задач в рамках проблематики, относящейся к сетям сотовой подвижной связи.

Цель исследования

Целью настоящего исследования является разработка теоретических положений, методологических и практических предложений по решению задачи синтеза оптимальной топологии сети подвижной радиосвязи при низкой вычислительной сложности такого решения.

Предмет исследования

Предметом исследования послужили проблемы практики и методологии работ по оптимизации сетей подвижной радиосвязи.

Объект исследования

Объектом исследования является сеть сотовой подвижной радиосвязи второго поколения стандарта GSM, хотя полученные методы и способы могут быть адаптированы к сетям практически любого поколения и стандарта, что продемонстрировано на примере сети четвертого поколения McWiLL.

Методология исследования

Методология исследования базируется на положениях теории монотонных систем (ТМС), разработанной И. Э. Мулламом, работах других отечественных и зарубежных ученых, посвященных тематике проектирования, планирования и оптимизации сетей сотовой подвижной связи, а также практике работы компаний-операторов сотовой связи.

Научная новизна

Научная новизна предлагаемого решения заключается в том, что синтез оптимальной сети радиодоступа с использованием нового для этой области проектирования математического аппарата теории монотонных систем позволяет аналитически строго решить поставленную задачу на исходном множестве большой мощности.

Практическая значимость

Практическая значимость состоит в том, что предложенные в диссертации разработки могут быть использованы в повседневной работе компаний-операторов сотовой связи и позволят развивать сети оптимальным образом, максимально эффективно используя частотный ресурс и оборудование сети, имея при этом минимум базовых станций (БС).

Апробация

Результаты исследования докладывались на российских и международных научно-практических конференциях и семинарах. Основные положения диссертации отражены в 11 научных статьях, опубликованных в 3 журналах и 8 брошюрах.

Результаты были апробированы в качестве инструмента для синтеза сети стандарта GSM оптимальной топологии, синтеза иерархической структуры сети GSM для г. Заречный Пензенской области, интеграции отдельных БС в существующее окружение на примере г. Дмитрова Московской области и для создания проекта развертывания сети четвертого поколения 4G/LTE. Также были предложены варианты использования разработанного алгоритма для целей планирования и оптимизации подвижных сетей как в виде следящей системы, так и в виде инструмента для анализа. Данные предложения могут применяться непосредственно в компаниях-операторах сотовых сетей связи.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, содержит 13 таблиц, 43 рисунка. Список литературы включает 50 наименований.

Общий объем диссертации составляет 148 листов, основная часть изложена на 129 листах.

В главе 1 проведен анализ проблем частотно-территориального планирования сетей подвижной радиосвязи. Приведен обзор существующего программного обеспечения для планирования и оптимизации сетей, методы его использования. Отдельное внимание уделено традиционным методам и подходам. Предложено усовершенствование традиционного метода проектирования сетей подвижной радиосвязи. Сформулирована задача о комплексном планировании сети связи за приемлемое время с исключением момента субъективности.

В главе 2 приводятся актуальные на сегодняшний момент практические задачи. На основе теории монотонных систем формулируется способ решения задач: формализуется критерий оптимальности, определяются правила формирования исходного множества, строится алгоритм синтеза оптимальной сети. В конце главы проводится анализ разработанного алгоритма и определяется его эффективность в сравнении с алгоритмом прямого перебора.

В главе 3 в качестве иллюстрации практического применения алгоритма, разработанного в рамках диссертационной работы, подробно разбирается пример синтеза оптимальной одноуровневой однодиапазонной сети связи стандарта GSM на примере города Костромы. В заключение показано применение алгоритма для решения задач проектирования одноуровневых и иерархических сетей, интеграции отдельных БС в существующее окружение, а также показано применение алгоритма для создания проекта сети четвертого поколения 4G/LTE.

В главе 4 по результатам приведенных в главе 3 изысканий разрабатывается модель следящей системы, которая имеет в своей основе разработанный в диссертации алгоритм синтеза сети оптимальной топологии и позволяет использовать его в автоматическом режиме для формирования рекомендаций по необходимым изменениям на сети в процессе изменения реальной нагрузки. Приводится общая схема «непрерывного» процесса оптимизации сети и реализация этого процесса на примере.

В **приложении** затрагиваются вопросы калибровки моделей распространения радиосигнала. Приводятся стандартные модели макро- и микросот, исследуются влияющие на точность получаемых результатов факторы, особенности использования моделей. На реальном примере рассматривается процесс калибровки модели по данным полевых измерений, сравниваются результаты расчетов уровней сигнала калиброванной и некалиброванной модели.

ГЛАВА 1

1.1. Анализ проблем частотно-территориального планирования сетей подвижной радиосвязи

Ключевой вопрос эффективной работы любой сотовой сети подвижной радиосвязи – частотно-территориальное планирование. В процессе своего существования сети требуют периодической оптимизации и перепланирования частотно-территориального плана (ЧТП). Это обусловлено тем, что сеть не является статичной, в ней постоянно идут процессы, связанные с корректировкой емкости базовых станций, добавлением новых БС, перераспределением трафика как между диапазонами внутри сети, так и между наложенными сетями, например, других поколений.

В настоящее время у российских компаний-операторов возникла задача глобального пересмотра ЧТП существующих сетей 2G, продиктованная необходимостью проведения так называемого «рефарминга» - высвобождения частотного спектра для нужд расширения сетей 3G и развертывания сетей 4G. Это выдвигает к частотно-территориальному плану сети 2G повышенные требования, что делает задачу построения оптимального ЧТП особенно актуальной.

При развертывании сети 4G перед компанией-оператором возникает задача разработки ее проекта. По сравнению с периодом развертывания сетей второго поколения ситуация облегчается тем, что, поскольку сети 2G и/или 3G уже развернуты, у планировщиков есть полная информация о всех возможных местах размещения БС, местах концентрации нагрузки, поведении абонентов, периодичности флуктуации трафика и т.п. Таким образом, задача синтеза оптимальной сети 4G может быть сведена к определению оптимального количества и мест расположения БС из, по сути, известного множества вариантов.

В попытке разрешить описанные выше задачи проектировщики используют целый ряд специализированных программных продуктов. Вместе с тем, процедура определения количества и мест расположения БС до сих пор полностью не автоматизирована и требует высокой квалификации и опыта работы с целым набором различных специализированных программных продуктов. В

связи с этим актуальной задачей является разработка алгоритма автоматизированного синтеза сетей беспроводного доступа, оптимальных с точки зрения топологии и емкости.

1.2. Проблемы роста сети

В жизненном цикле любой сети связи можно выделить два значимых этапа: этап развертывания сети и следующий за ним этап эксплуатации.

На этапе развертывания сети основной целью является скорейшее обеспечение как можно более полного радиопокрытия рассматриваемой территории. Нагрузка на сеть на этом этапе незначительна, поэтому она не рассматривается как фактор, накладывающий существенные ограничения при подготовке проекта сети. Принимается, что базовые станции будут работать в режиме ограничения по покрытию, а не по емкости, что позволит обеспечить покрытие территории относительно небольшим количеством базовых станций. Для этих целей, как правило, выбираются более высокие места установки антенн. Это позволяет сократить расходы на развертывание сети и необходимое для запуска сети время. На этом этапе такой подход себя оправдывает и является наиболее целесообразным.

Далее наступает этап эксплуатации сети. Если говорить о коммерческих сетях связи, то операторы таких сетей нацелены на привлечение как можно большего количества абонентов. Поэтому, по мере роста абонентской базы, возникает необходимость адаптировать сеть под меняющуюся нагрузку. Самым критичным для сетей подвижной радиосвязи является объем частотного ресурса, которым обладает оператор сети. Именно этот ресурс и динамика роста нагрузки определяют стратегию развития сети.

Наиболее простым и малозатратным является путь расширения емкости базовых станций путем добавления новых приемопередатчиков. У такого пути есть ограничение, определяемое конструктивными особенностями оборудования – это максимально возможное количество приемопередатчиков, которое можно установить на одной базовой станции. Более того, важным ограничением выступает объем доступного частотного ресурса. Таким образом, очень скоро

повышать емкость сети только за счет добавления новых приемопередатчиков становится невозможно. Появляется необходимость в строительстве новых базовых станций.

Увеличение емкости сети за счет строительства новых базовых станций требует целого ряда согласованных мероприятий. При установке между двумя существующими базовыми станциями новой БС необходимо подвергнуть ревизии высоты, азимуты, углы установки антенн, мощности передатчиков, списки соседей и параметры настройки алгоритмов хендоверов на всех трех базовых станциях так, чтобы исключить взаимное влияние двух исходных базовых станций. Только в этом случае возможно эффективное использование имеющегося частотного ресурса, что, в конечном итоге, и позволяет наращивать емкость сети. В противном случае неправильная интеграция новых базовых станций в действующую сеть приведет к стремительному росту интерференции. Как следствие, упадет качество предоставления услуг, что, в свою очередь, может вызвать отток абонентов и потерю прибыли оператором.

Интеграция нескольких БС может и не вызвать этих проблем, но однозначно потребует существенных затрат времени для гармонизации новых и старых БС, поскольку будет представлять из себя итерационный процесс пересмотра высот, азимутов, углов установки антенн, мощностей передатчиков, списков соседей и параметров настройки алгоритмов хендоверов. При массовом же строительстве новых базовых станций результат будет далек от оптимального, причем как по времени, так и по качеству.

Помимо описанных выше путей увеличения емкости сети, которые относятся к уровню базовых станций и уровню сети в целом, существует возможность увеличить емкость на канальном уровне благодаря более эффективному использованию ресурсов радиоканала. Например, в сети GSM такое возможно за счет внедрения полускоростного кодирования [1, 2], в сети WCDMA – за счет внедрения более эффективных типов частотной модуляции [3].

Вместе с тем, при попытке увеличить емкость сети на канальном уровне или за счет работ по оптимизации мы непременно столкнемся с тем, что

требования к состоянию частотно-территориального плана сети значительно возрастут [1, 2].

1.3. Существующее программное обеспечение и методы его использования

Сети связи третьего поколения существуют не первый год, сетям стандарта GSM уже более двадцати лет. За это время было создано немало инструментов и методик, позволяющих оптимизировать работу сетей на различных этапах их существования.

Практически каждый производитель телекоммуникационного оборудования готов предложить компании-оператору целый набор программных продуктов, с помощью которых можно проводить мониторинг состояния сети, а так же работы по оптимизации.

Аналогичные решения предлагают и сторонние компании-разработчики. Они же нередко могут проводить комплексные оптимизационные работы по заказу операторов сетей.

Далее в качестве иллюстрации к сказанному выше приведены некоторые примеры существующего программного и программно-аппаратного обеспечения.

Система планирования сотовой связи *Onega Planning System (OPS)* - представляет из себя программно-аппаратный комплекс, позволяющий производить расчет покрытия, а также автоматизированное формирование частотного плана в следующих вариантах [4]:

- автоматическое распределение частот;
- автоматическое распределение частот с учетом имеющегося закрепления частот за секторами;
- индивидуальная смена частот для выбранной соты;
- определение количества закрепленных частот и коэффициентов повторного их использования,

а также дает возможность:

- учитывать взаимное расположение излучателей и диаграмм направленности антенн взаимодействующих приемо-передающих средств;

- учитывать пространственную неоднородность и нерегулярность уровней сигналов и помех над реальной земной поверхностью;
- интерактивно управлять сочетанием ручных и автоматических процедур анализа, выбора и назначения частот;
- определять компромисс между степенью достижения наилучшей расстановки частот и временем расчетов;
- комплексно оценивать результаты частотного планирования по совокупности характеристик качества связи и взаимных помех на всей охватываемой территории.

Система планирования сотовой связи *TEMS CellPlanner Universal* - программное обеспечение, разработанное компанией Ericsson [6]. Включает несколько модулей:

- модуль *AFP (Automatic Frequency Planner)* для автоматического частотного планирования сети;
- модуль для моделирования распространения радиосигнала с поддержкой различных моделей распространения;
- модуль, позволяющий использовать файлы с результатами мобильных тестов для настройки моделей распространения радиосигнала, а также для конфигурации параметров сети.

Система планирования *Nokia NetAct Planner* – разработка компании Nokia [7]. Система включает 6 модулей, наибольший интерес из которых представляют модули:

- *NetAct Optimal Planner* – представляет из себя типичный *ACP (Automatic Cell Planner)*. Производит автоматическую оптимизацию таких параметров сети, как азимуты и углы наклона антенн, а также мощности излучения для снижения потенциальной интерференции в сети.
- *NetAct Radio Planner* – предназначен для планирования сетей GSM и TETRA.

Система автоматизированного проектирования сетей радиосвязи "Балтика" – отечественная разработка [8]. Предназначена для частотно-территориального планирования сетей радиосвязи и экспертизы ЭМС РЭС.

Набор оптимизационных решений от компании *SCHEMA* [9]:

- *Ultima Forte* - Оптимизация частотного плана на основе измерений мобильных станций.
- *Ultima Planning* - включает модуль расчета радиосигнала на основе различных моделей и модуль создания частотного плана с минимальной интерференцией.
- *Ultima OptiPlanner* - модуль позволяет оптимизировать покрытие существующей сети, оптимизировать емкость сетевых элементов, а также ускорить и упростить интеграцию новых сетевых элементов.
- *Ultima Mentor* – модуль для оптимизации сети WCDMA на основе измерений, передаваемых абонентскими терминалами. В автоматическом режиме выдает рекомендации по таким параметрам сети как углы наклона антенн, мощности излучения и списки соседей.

Набор программных средств от производителя оборудования *Alcatel* [10] включает в себя модули:

- *Alcatel 955 Radio Network Planning* - обеспечивает расчет покрытия, планирование частот;
- *Alcatel 956 Radio Network Optimization* – оптимизация первичных и вторичных параметров сети.

Внутренняя разработка компании-оператора сети GSM “Билайн” - включает программные модули:

- **Структурная оптимизация сети** - выполняется для получения оптимальной с точки зрения радиопокрытия конфигурации сети (схемы расположения базовых станция и ориентации секторов).

- **Частотно-территориальное планирование** - за счет решения задачи многокритериальной оптимизации, направленное на минимизацию доли трафика, для которой не выполняются требования к качеству связи.

Разработка компании *FORSK* – платформа для планирования и оптимизации сетей радиосвязи, поддерживающая широкий спектр технологий [11].

Программные модули:

- *ACP* - модуль автоматической оптимизации первичных параметров сети (высоты, углы наклона, азимуты и т.д.);
- *AFP* - модуль автоматического частотного планирования.

Программные платформы от компании *Actix* [12]:

- *Radioplan ACP* - позволяет подбирать в автоматическом режиме оптимальные механические и электрические углы наклона антенн, азимуты главного лепестка антенн, излучаемую мощность, высоты подвеса антенн, площадки для размещения базовых станций из числа кандидатов, оптимизировать списки соседей.

- *CellOpt AFP* - модуль автоматического частотного планирования.

Существуют и другие программные продукты аналогичного назначения. Как используются описанные выше инструменты в процессе оптимизации сети?

За годы своей работы в компаниях-операторах были разработаны технологические процессы планирования и оптимизации сетей радиодоступа. На современном этапе развития, когда сети обслуживают миллионы абонентов, а количество базовых станций измеряется сотнями и тысячами, планирование и оптимизация немислимы без программных продуктов, которые упомянуты выше. Но, не смотря на свою мощностъ и эффективностъ, эти программы являются лишь инструментами в руках экспертов и используются последовательно на отдельных этапах технологического процесса.

Процесс адаптации сети под меняющуюся нагрузку можно разбить на два логических этапа:

- планировочный этап – на основании анализа статистических данных и карт местности принимается решение о необходимости интеграции в сеть нового оборудования (дополнительных передатчиков на существующих БС и/или дополнительных БС);
- оптимизационный этап – гармонизация сети после внесения новых элементов. В зависимости от объемов внесенных изменений может потребоваться локальный или глобальный пересмотр частотного плана, изменение углов наклона антенн, азимутов направленности секторов, мощностей излучения, а также вторичных параметров настройки сети (списки соседей, уровни доступа в сеть и т.д.).

На первом этапе используются программные средства, с помощью которых проводится расчет уровней сигнала, а также цифровые карты и средства визуализации, позволяющие анализировать территорию, уровни сигналов от базовых станций и необходимую статистику о работе сети. Варианты размещения и конфигурации новых БС определяются экспертным путем. Оценка эффективности предлагаемых решений проводится посредством имитационного моделирования на основе математических расчетов по заданным моделям.

На втором этапе в дело вступают программные средства типа *АСР* (*инструмент для автоматической оптимизации первичных параметров сети*) и *АФР* (*инструмент для автоматического частотного планирования*).

Необходимость использования того или иного инструмента, а также последовательность их применения определяются экспертом в каждом случае отдельно.

Отметим, что приведенные выше планировочный и оптимизационный этапы не одинаковы по степени воздействия на сеть и требуют совершенно разного времени на реализацию. Схематически это показано на рис. 1.1 и 1.2.

Оптимизационное мероприятие

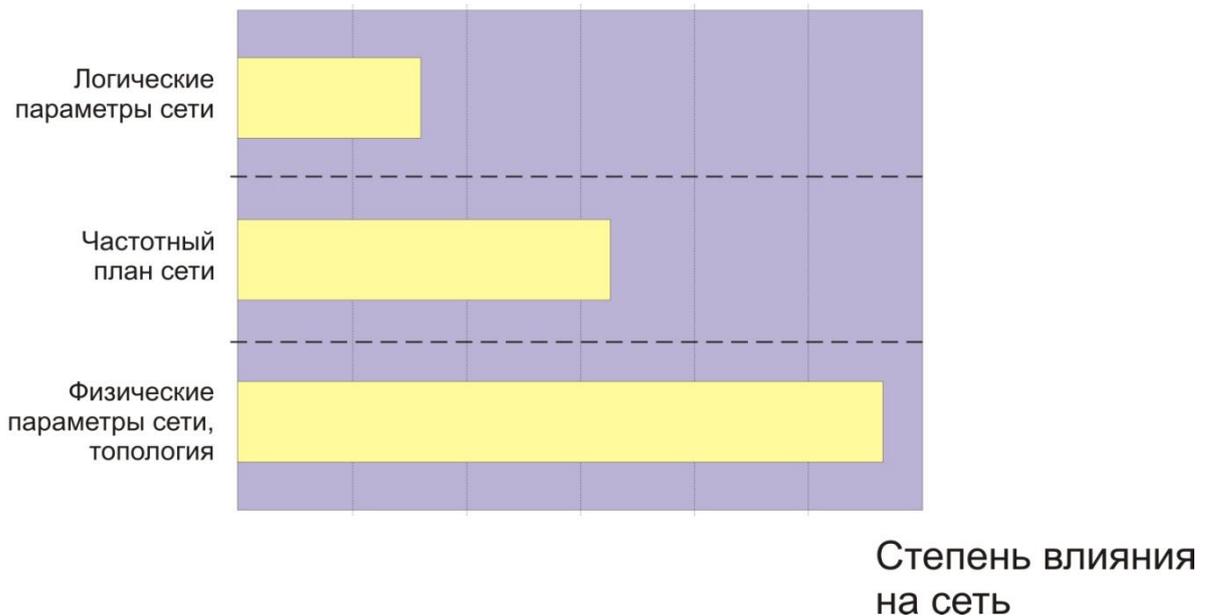


Рис. 1.1. Степень влияния на сеть оптимизационных мероприятий

Оптимизационное мероприятие



Рис. 1.2. Трудозатраты при проведении оптимизационных мероприятий

Объем оптимизационных работ вытекает из того, какие планировочные изменения будут применены на сети. И то и другое решение принимается на экспертном уровне. При этом важно учитывать, что процедура добавления передатчиков на существующих БС требует несравнимо меньшего времени для реализации, чем развертывание новой БС. В итоге может получиться, что на

каком-то этапе в результате проведенного анализа экспертом будет принято решение о расширении нескольких секторов и строительстве нескольких БС. Из-за разницы по времени, необходимом для реализации такого набора рекомендаций, оптимизационные работы придется разбить на две или более частей и проводить их по мере завершения работ планировочного этапа. А если учесть, что работы по расширению сети ведутся постоянно, то можно сделать вывод, что в каждый отдельный интервал времени, который может измеряться неделями, сеть находится далеко не в оптимальном состоянии.

Есть еще одно важное замечание: при такой методологии работ топология сети слабо зависит от частотного ресурса, имеющегося у оператора, точнее, не определяется частотным ресурсом. В этом случае интерференция становится неизбежной, а вся оптимизация сводится к ее минимизации.

1.4. Анализ традиционного процесса частотно-территориального планирования

Рассмотрим, что представляет из себя традиционный подход к планированию сети. Процесс планирования сети подчинен трем основным требованиям:

1. Обслуживать заданное количество подвижных абонентов;
2. Предоставлять услуги с уровнем качества не ниже заданного;
3. Обеспечивать конкурентоспособную стоимость предоставления этих услуг.

Для того, чтобы в результате получить сеть, как можно более точно отвечающую установленным требованиям, первоначально необходимо получить следующие данные:

1. Модель трафика:
 - вид предоставляемых услуг;
 - прогнозную нагрузку;
 - степень подвижности абонентов.
2. Предполагаемый уровень качества предоставления услуг:
 - уровень блокировок в сети;

- уровень качества передачи речи или данных.
3. Критерий эффективности:
- количество базовых станций;
 - коэффициент повторного использования частот.

При планировании сети сотовой подвижной связи существует ряд ограничений, способных оказать существенное влияние на результаты планирования. Эти ограничивающие факторы можно разделить на две категории:

1. Физические

- частотный ресурс;
- распространение радиоволн над поверхностью земли.

2. Системные

- характеристики радиоприемников;
- мощность радиопередатчиков;
- существенные конструктивные и планировочные ограничения используемого оборудования.

Важно отметить, что процесс планирования ведется с использованием целого набора математических моделей, что неизбежно приводит к некоторому упрощению реальной действительности. Но, тем не менее, это дает возможность получить ответы на важные для принятия решений вопросы и позволяет:

- оценить влияние тех или иных физических факторов;
- установить взаимосвязь между системными параметрами и понять их влияние на используемые алгоритмы;
- получить более точные значения системных параметров.

Требования в части трафиковой нагрузки и территории обслуживания являются отправной точкой при планировании. Исходя из функционального назначения, применяемые базовые станции делятся на два класса:

1. БС с ограничением по максимально возможному радиусу действия приемо-передатчиков;
2. БС с ограничением по емкости из-за высокой удельной плотности

абонентов.

У базовых станций с ограничением по максимально возможному радиусу действия приемо-передатчиков территория обслуживания ограничивается допустимой мощностью излучения передатчиков и чувствительностью приемников. Базовые станции такого типа применяются в основном в сельской местности;

У базовых станций с ограничением по емкости из-за высокой удельной плотности абонентов территория обслуживания ограничивается допустимой емкостью данной базовой станции. Ограничение может быть вызвано как конструктивными особенностями используемого оборудования, так и размером имеющегося у оператора сети связи частотного ресурса. Базовые станции такого типа применяются, как правило, в городах, где основной проблемой является интерференция.

Распространение радиосигнала в пространстве в значительной степени зависит от топологии местности. Сильное негативное воздействие оказывают холмистая местность, лес, городская застройка. Именно поэтому при планировании необходимо учитывать особенности конкретной территории.

Уровень сигнала, принимаемого абонентом на городской улице, зависит от поглощающих, затеняющих, дифракционных и рефракционных свойств объектов, встречающихся вдоль трассы распространения сигнала и непосредственно вокруг абонента. Поэтому, для реалистичного прогноза распространения радиосигнала и оценки его уровня в точке, необходимо использовать модель распространения сигнала, приведенную в соответствие с топологией конкретной местности.

Важным фактором, влияющим на результаты моделирования, является морфологическая характеристика территории:

- высота зданий и плотность застройки (центр города, город, пригород, сельская местность, промышленный район, жилой район);
- лес, парк, открытая местность, водная поверхность.

Области радиотени, появляющиеся на холмистой местности и способные значительно ухудшить показатели покрытия территории, должны выявляться при рассмотрении профиля земной поверхности вдоль трасс распространения сигнала.

Необходимо отметить, что точность результатов моделирования сильно зависит от разрешения, детализации и актуальности цифровой карты местности, что напрямую влияет на стоимость такой карты. С помощью цифровой карты местности и типовых моделей распространения радиосигнала, выбранных в соответствии с типом рассматриваемой территории, можно получить оценку напряженности поля в какой-либо точке без детального представления о конкретных условиях в этой точке. Изменяя расположение базовой станции и ориентацию антенн в пространстве, можно добиться радиопокрытия территории с достаточно высоким качеством.

При проектировании сети радиосвязи необходимо учитывать факт постепенного увеличения количества обслуживаемых абонентов. Поэтому концепция развития сети должна включать несколько этапов.

На первоначальном этапе сеть обслуживает относительно небольшое количество абонентов. В тоже время, уже на этом этапе необходимо обеспечить сплошное покрытие обслуживаемой территории. При этом места размещения базовых станций, строящихся на этом этапе, должны выбираться так, чтобы обеспечивался заданный уровень эффективности при дальнейшем развитии сети.

Росту числа абонентов сети (что эквивалентно росту уровня интерференции) должна сопутствовать работа по увеличению емкости существующих базовых станций и строительству новых. Это неизбежно приведет к необходимости пересмотра параметров существующих базовых станций и частичному или полному пересмотру частотно-территориального плана. Именно по этой причине при планировании сети целесообразно заранее учитывать перераспределение абонентской нагрузки в будущем.

Проблемы с интерференцией, возникающие при увеличении плотности установки базовых станций, можно отчасти разрешить путем увеличения угла

наклона направленных антенн, изначально установленных таким образом, чтобы обеспечивать максимальную площадь обслуживания.

После первоначальной процедуры планирования, проведенной на теоретической основе, места предполагаемой установки базовых станций нуждаются в подтверждении. Кроме того, необходимо выяснить, как обстоят дела с электропитанием и доступом к линиям связи.

Очень важным вопросом является возможность установки антенн базовой станции на необходимой высоте над поверхностью кровли или над поверхностью земли. Также необходимо принять во внимание влияние окружающей среды (в данном случае имеются в виду объекты, создающие радиотень или отражающие сигнал).

Полученные на предыдущих шагах данные являются основой для завершающего этапа сетевого планирования. Модель сети, которую необходимо получить в итоге, должна обеспечивать:

- уровень сигнала по всей территории не ниже заданного;
- достаточную пропускную способность в соответствии с требованиями оператора;
- детальный частотный план для каждой ячейки;
- уровень повторного использования частот, отвечающий требованиям по интерференции.

Результатом должна стать структура радиосети и конфигурация каждой из входящих в нее базовых станций. После этого можно перейти к определению емкости линий связи, соединяющих базовые станции с сетевыми элементами опорной сети.

Обобщив изложенную методику, можно сделать несколько заключений. Итак, главными целями при планировании сети подвижной радиосвязи являются:

1. Сбор основной информации для планирования;
2. Составление цифровой карты местности;
3. Выбор мест расположения базовых станций;
4. Настройка инструмента планирования;

5. Разработка структуры сети;
6. Анализ результатов и оптимизация.

К основной информации относится:

1. Территория обслуживания;
2. Трафик и его распределение по территории;
3. Классы мобильности абонентов и требуемое качество услуг;
4. Этапы развития сети (прогноз изменения абонентской базы);
5. Доступный частотный диапазон;
6. Частотно-территориальный план в первом приближении;
7. Требуемое количество базовых станций;
8. Примерная конфигурация оборудования;
9. Бюджет проекта.

Топографические и морфографические свойства планируемого региона должны быть отражены на цифровой карте. Карта должна содержать информацию:

- о профилях земной поверхности (топография);
- о типах местности (морфография).

Возможные источники такой информации:

- отсканированные топографические карты;
- спутниковые или аэрофотоснимки.

Выбор мест расположения базовых станций включает в себя этапы:

- выбор конкретных мест размещения базовых станций;
- радиоизмерения в типичных для рассматриваемой территории местах;
- радиоизмерения в сложных с топографической точки зрения местах.

Для адаптации используемых моделей распространения сигнала к условиям реальной местности необходимо произвести ряд радиоизмерений. Настроенные на основе проведенных измерений модели могут применяться для мест со схожими условиями распространения.

Для мест со специфическими условиями требуются отдельные измерения и свои модели. Пренебрежение этим правилом может привести к тому,

что полученные результаты будут очень далеки от реальной действительности. Подробнее этот вопрос рассмотрен в Приложении 1.

Заключительный этап планирования структуры радиосети производится с помощью адаптированных к реальной местности моделей. Его цель:

- достигнуть необходимого уровня сигнала по всей рассматриваемой территории;
- добиться достаточной емкости сети и пропускной способности в соответствии с реальным распределением абонентов;
- назначить радиочастоты по всем ячейкам;
- добиться снижения уровня интерференции;
- определить соседей для секторов каждой базовой станции.

Анализ статистических данных и данных измерений, полученных с помощью тестовых телефонов в ходе полевых испытаний на действующей сети, позволят провести оптимизацию параметров работы сети.

1.5. Анализ способов совершенствования традиционного подхода к частотно-территориальному планированию

Эффективность работы сети напрямую зависит от эффективности ее частотно-территориального плана. Современные методы оптимизации представляют собой итерационную процедуру оптимизации:

- топологии действующей сети (азимуты, высоты подвеса и углы наклона антенн функционирующих БС);
- емкости действующих базовых станций;
- частотного плана для текущей топологии сети при имеющейся емкости действующих БС.

Через некоторое время по мере роста нагрузки оптимизированная таким образом сеть перестает справляться с текущим объемом трафика по причине нехватки частотного ресурса (выражается в повышении уровня внутрисистемной интерференции и, как следствие, в снижении качества предоставления услуг связи) или из-за невозможности дальнейшего увеличения емкости существующих БС (аппаратные ограничения используемого оборудования БС).

Выход – добавление новых БС. Это, в свою очередь, требует пересмотра частотно-территориального плана, т.е. выполнения очередной итерации процедуры оптимизации сети.

Ввиду последовательного характера выполнения операций, каждая из которых требует значительного времени на проведение и внедрение, получаем далеко не оптимальную работу сети на протяжении рассматриваемого периода.

Решением проблемы может быть совместная взаимоувязанная оптимизация топологии сети с одновременным учетом:

- доступного частотного ресурса;
- максимально допустимой емкости каждой из действующих БС;
- мест возможной установки и параметров возможной установки новых БС;
- текущего или прогнозируемого трафика на сети;
- особенностей распространения радиосигнала каждой из рассматриваемых БС;
- заданных критериев качества работы сети (уровень блокировок, покрытие с уровнем сигнала не ниже заданного, определенное соотношение «сигнал/интерференция»).

Основным ограничением при решении таким образом поставленной задачи является экспоненциальный рост сложности вычислительных алгоритмов [13, 14], не позволяющий найти решение задачи за приемлемое время.

Анализ особенностей структуры и функционирования сетей сотовой подвижной радиосвязи, а так же методик проектирования этих сетей позволил сформулировать ряд принципов и допущений:

1. Больше частотный ресурс => больше частот на сектор => больше емкость сектора => больше зона обслуживания сектора => меньше БС для покрытия рассматриваемой территории.
2. Добавить приемо-передатчик проще и дешевле, чем развернуть новую базовую станцию.
3. Количество приемо-передатчиков на БС ограничивается:

- особенностями оборудования;
 - особенностями места размещения БС (аппаратное помещение/крыша/башня/столб);
 - объемом доступного частотного ресурса.
4. Повторное использование частот тем эффективнее, чем меньше взаимовлияние базовых станций в сети.
 5. На границе сети важнее обеспечить покрытие, нежели емкость (т.е. предпочтение должно быть отдано станциям покрытия, а не емкости).
 6. При фиксированном трафике на сети количество БС в целом обратно пропорционально частотному ресурсу.

Анализ статистических данных о работе действующих сетей показал, что нагрузка на сети имеет суточную, недельную, сезонную и годовую цикличность. Пример суточной цикличности представлен на рис.1.3. Делать выводы о необходимости проведения модернизации сети по данным об изменении нагрузки за час или день не представляется разумным, так как нагрузка подвержена в том числе и случайным флуктуациям, которые могут быть обусловлены непродолжительными локальными авариями на сети или же проведением каких-либо массовых мероприятий с краткосрочным присутствием большого количества активных абонентов на небольшой территории. Вместе с тем, сезонные и годовые данные делают реакцию на изменения слишком замедленной.

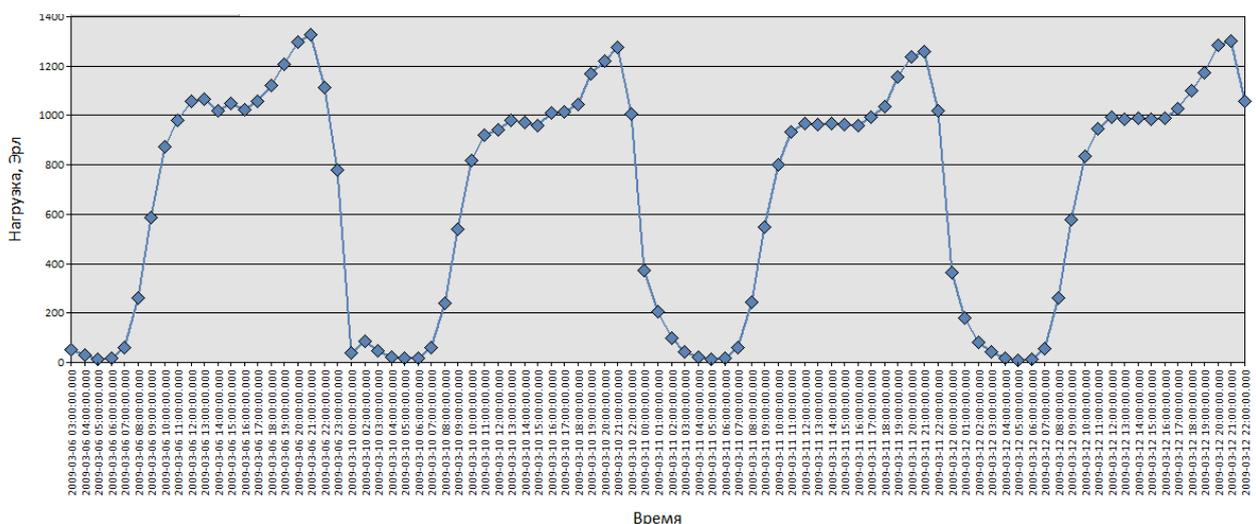


Рис. 1.3. Суточная цикличность нагрузки

Таким образом, наиболее целесообразным интервалом наблюдения за сетью для принятия решения о необходимости проведения ее модернизации представляется недельный интервал. Из этого следует, что поиск оптимальной конфигурации сети по полученным за отчетный период данным должен быть завершен до поступления данных по следующему недельному интервалу, т.е. этот процесс должен измеряться максимум единицами дней.

Выводы к главе 1

1. Традиционные подходы к частотно-территориальному планированию сетей подвижной радиосвязи не позволяют получать решение задачи об оптимальном ЧТП сети в режиме реального времени.
2. На основе проведенного анализа показано, что сеть оптимальной топологии, отвечающая установленным требованиям по качеству обслуживания, может быть получена при условии совместного взаимоувязанного рассмотрения следующего набора существенных параметров:
 - доступного частотного ресурса;
 - максимально допустимой емкости каждой из действующих БС;
 - мест и параметров возможной установки новых БС;
 - текущего или прогнозируемого трафика на сети;
 - особенностей распространения радиосигнала каждой из рассматриваемых БС;
 - заданных критериев качества работы сети (уровень блокировок, покрытие с уровнем сигнала не ниже заданного, определенное соотношение «сигнал/интерференция»).
3. Приемлемое время поиска оптимального варианта частотно-территориального плана сети должно измеряться максимум единицами дней.

ГЛАВА 2

2.1. Алгоритм оптимизации

Для эффективного решения задачи выделения необходимого для развертываемых сетей 4G частотного ресурса за счет его высвобождения в сетях GSM необходимо обеспечить решение двух взаимосвязанных задач:

1. Создание частотно-территориального плана сети GSM с максимальным сохранением качества предоставления услуг при сокращении используемого частотного ресурса.
2. Создание частотно-территориального плана сети 4G с максимальным уровнем качества предоставления услуг при выделяемом частотном ресурсе.

Обе задачи могут быть решены с помощью разрабатываемого в настоящей работе алгоритма, за основу которого взят алгоритм, предложенный в [1].

2.1.1. Критерий оптимальности

Предположим, что на начальном этапе рассуждений определены следующие системные параметры:

- территория площадью S , на которой необходимо обеспечить сплошное радиопокрытие;
- карта трафика в виде матрицы $T_{m \times n}$ (графическое представление карты на примере голосового сервиса показана на рис. 2.1);
- доступный частотный диапазон F ;
- требуемое качество предоставления услуг Q (например, минимальный уровень сигнала на рассматриваемой территории, допустимый уровень блокировок, минимальные соотношения «сигнал/помеха» и т.п.).

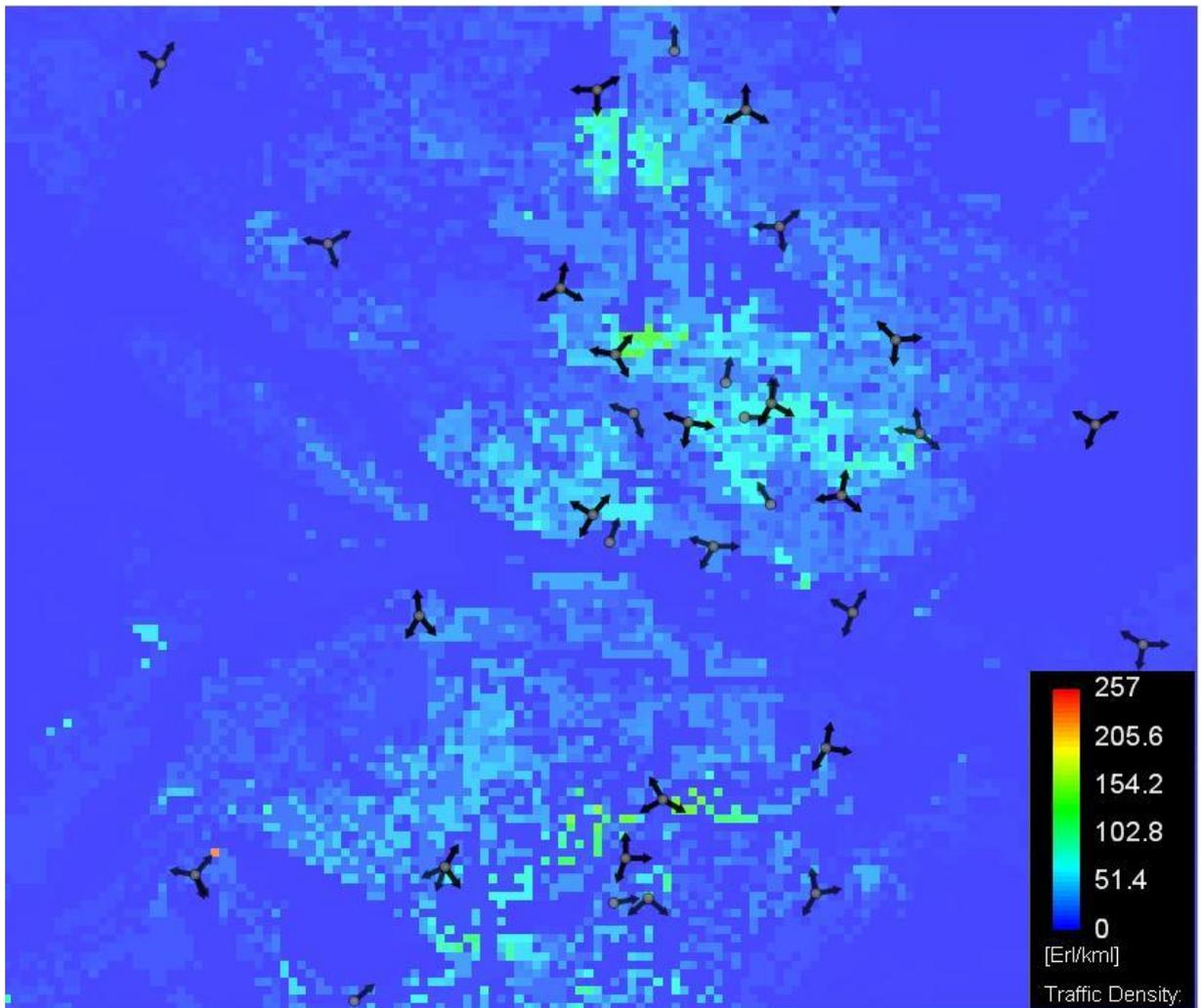


Рис. 2.1. Графическая интерпретация матрицы трафика

Также предположим, что:

- задано множество $W_{\text{БС}}$ всех потенциальных мест установки базовых станций в виде географических координат $(x_0, y_0)_i$ и высот установки антенн h_i ;
- каждая базовая станция представляет собой совокупность трех секторов, независимых с точки зрения настройки физических и логических параметров;
- для каждого потенциального места установки базовой станции определены локальные ограничения по использованию имеющегося частотного ресурса;
- в случае с сетью GSM для каждого сектора определено максимально возможное количество приемопередатчиков.

Исходя из имеющегося множества $W_{\text{БС}}$ всех потенциальных мест установки базовых станций, трехсекторной организации каждой БС, максимально возможного количества приемопередатчиков и с учетом, в случае сети GSM, потерь в комбайнере в зависимости от количества приемопередатчиков, определим множество конфигураций секторов $W_{\text{К}}$.

Здесь необходимо отметить, что из-за особенностей реализации радиоинтерфейса в виде набора РЧ-каналов шириной 200 кГц и особенностей функционирования радиооборудования – наличия потерь в комбайнере в зависимости от количества задействуемых приемопередатчиков – сеть GSM с точки зрения проводимых рассуждений сложнее в рассмотрении, т.к. требует учета большего количества условий. По этой причине далее рассуждения будут проводиться для сети GSM. Полученный результат будет применим к сетям 4G путем «обнуления» соответствующих условий.

Итак, конфигурации одного сектора будут отличаться друг от друга только уровнем потерь в комбайнере. Все остальные параметры у них будут одинаковы (сами параметры будут рассмотрены далее). Схематически процесс получения множества $W_{\text{К}}$ показан на рис. 2.2.

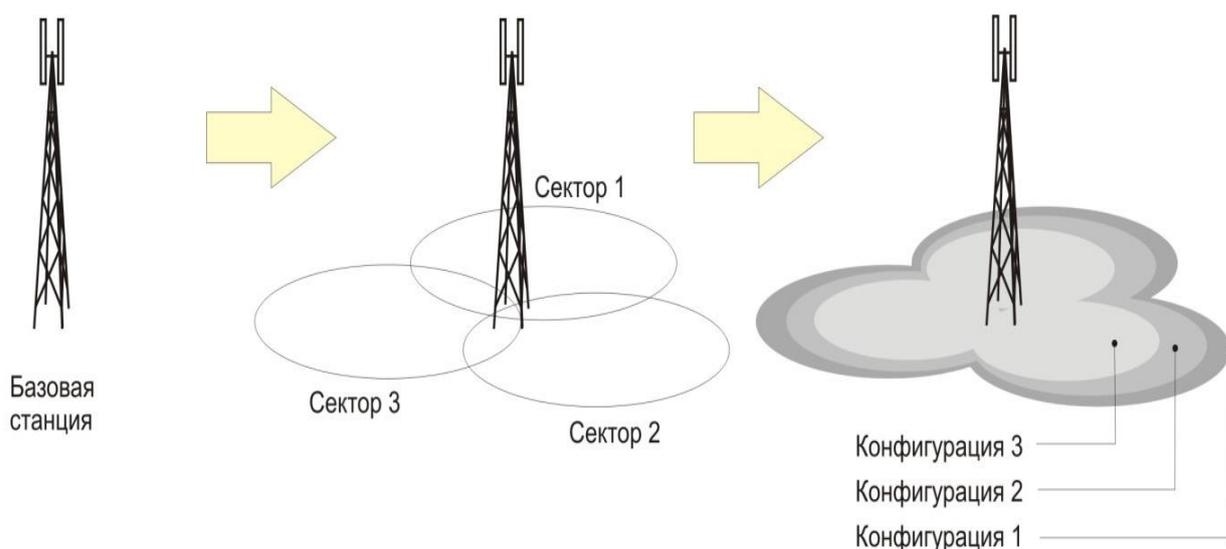


Рис. 2.2. Построение множества $W_{\text{К}}$

Тогда **сеть радиодоступа** будет представлять собой некоторое подмножество конфигураций секторов $W \subseteq W_K$, которое удовлетворяет заданным системным параметрам и отвечает двум обязательным требованиям:

- на базовой станции не может быть меньше трех секторов;
- каждый сектор не может иметь одновременно несколько конфигураций.

Совершенно понятно, что из множества W_K можно составить не один вариант сети радиодоступа в виде подмножества $W \subseteq W_K$. Кроме того, так как исходное множество W_{BC} является избыточным по числу БС, то W может содержать меньшее количество элементов.

Оптимальной сетью радиодоступа будем называть сеть радиодоступа, описываемую множеством W^{opt} , которое удовлетворяет заданным системным параметрам и при этом содержит минимальное количество элементов.

Критерий оптимальности в таком случае можно записать в виде:

$$|W^{opt}| = \min_{W \subseteq W_K} |W| \Big|_{F, S, Q, T_{max}},$$

или же:

$$W^{opt} = \arg \min_{W \subseteq W_K} |W| \Big|_{F, S, Q, T_{max}}. \quad (2.1)$$

Критерий оптимальности в виде формулы (2.1) позволяет формализовать задачу синтеза оптимальной сети радиодоступа. Для решения этой задачи необходимо разработать алгоритм, позволяющий за приемлемое время из исходного множества W_K получить искомое подмножество W^{opt} .

2.1.2 Формирование исходного множества

Для формирования исходного множества W_K необходимо сначала сформировать множество базовых станций W_{BC} , затем провести секторизацию каждой БС и определить необходимые характеристики для секторов.

2.1.2.1 Потенциальные места установки базовых станций

Этап определения потенциальных мест установки базовых станций является наиболее критичным с точки зрения конечного результата. Это обусловлено тем,

что процесс оптимизации состоит в выборе оптимального подмножества исходного множества, т.е. происходит исключительно в рамках выбранного множества потенциальных мест установки базовых станций.

Суть этапа определения множества $W_{\text{БС}}$ состоит в детальном изучении рассматриваемой территории, для которой планируется сеть радиопокрытия, и определении всех площадок для строительства базовых станций, где это теоретически возможно, а также в определении максимальной целесообразной высоты размещения антенн на каждой из площадок.

В случае, если сеть предполагает наличие иерархической организации, то каждый из слоев имеет смысл рассматривать отдельно. При этом должное внимание нужно уделить стратегии распределения трафика между различными уровнями иерархии и, соответственно, использованию значений матрицы трафика, чтобы исключить двойной счет.

То же самое относится и к рассмотрению сетей, работающих в двух диапазонах (например, GSM900/1800).

Итогом формирования множества $W_{\text{БС}}$ должно стать множество пар $\{ \langle x_0, y_0 \rangle_i, h_i \}$, определяющее географические координаты и высоту размещения антенн для каждого потенциального места установки базовой станции.

2.1.2.2. Элементы исходного множества

Теперь, исходя из сформированного множества $W_{\text{БС}} = (\{ \vec{A}_i \}: \vec{A}_i = \{ \langle x_0, y_0 \rangle_i, h_i \})$, определим исходное множество $W_{\text{К}}$. Для этого сначала необходимо провести секторизацию каждой БС – определить азимут антенн $azmt_{ij}$ j -го сектора i -ой базовой станции и, соответственно, тип антенн ant_typ_{ij} .

С точки зрения радиопокрытия и экономической эффективности, что немаловажно, наиболее целесообразно использовать трехсекторные базовые станции, а с точки зрения частотного планирования оптимальной является одинаковая для всех БС схема выбора азимутов, например $\{0^\circ, 120^\circ, 240^\circ\}$.

После формирования секторов для каждого из них необходимо задать существенные с точки зрения формирования зон радиопокрытия технические характеристики:

β_m^{ij} – угол механического наклона антенны j -го сектора i -ой базовой станции;

β_e^{ij} – угол электрического наклона антенны j -го сектора i -ой базовой станции;

P_{TRX}^{ij} – реальная мощность на выходе передатчика j -го сектора i -ой базовой станции;

L_f^{ij} – потери в фидере j -го сектора i -ой базовой станции;

L_c^{ij} – потери в комбайнере АФУ j -го сектора i -ой базовой станции;

N_{TRX}^{ij} – максимально допустимое количество передатчиков j -го сектора i -ой базовой станции,

причем потери в комбайнере АФУ в общем случае напрямую зависят от количества установленных в секторе приемопередатчиков, т.е. L_c^{ij} представляет собой некоторую функцию $f(N_{TRX}^{ij})$, определяемую параметрами используемого оборудования, и может выглядеть, например, так:

$$L_c^{ij} = \begin{cases} 1.2 \text{ дБм при } N_{TRX}^{ij} = 1, 2 - \text{конфигурация 1;} \\ 3 \text{ дБм при } N_{TRX}^{ij} = 3, 4 - \text{конфигурация 2;} \\ 6 \text{ дБм при } N_{TRX}^{ij} = 5, 6, 7, 8 - \text{конфигурация 3.} \end{cases} \quad (2.2)$$

При таком описании L_c^{ij} у каждого сектора может быть три конфигурации с точки зрения L_c^{ij} и N_{TRX}^{ij} , т.е.

$$L_c^{ij} = f(N_{TRX}^{ij}) = L_c^{ijk}, \quad (2.3)$$

где k – номер соответствующей конфигурации.

Таким образом, по результатам данного этапа получаем исходное множество W_K , состоящее из набора различных конфигураций каждого сектора всех базовых станций из множества W_{BC} , которое можно описать так:

$$W_K = (\{ \vec{K}_{ijk} \}):$$

$$\vec{K}_{ijk} = \{ \langle x_0, y_0 \rangle_i, h_i, azmt_{ij}, ant_typ_{ij}, \beta_m^{ij}, \beta_e^{ij}, P_{TRX}^{ij}, L_f^{ij}, L_c^{ijk}, N_{TRX}^{ijk} \}, \quad (2.4)$$

где \vec{K}_{ijk} – вектор существенных с точки зрения формирования зон радиопокрытия технических характеристик k -ой конфигурации j -го сектора i -ой базовой станции, $k = 1 \dots 3, j = 1 \dots 3, i = 1 \dots |W_{\text{БС}}|$.

2.1.3. Существенные свойства оптимальной сети

Сеть радиодоступа, построенная по критерию (2.1), будет обладать следующими существенными свойствами:

1. *Множество базовых станций сети будет полностью безызбыточным.*

Т.е., исключение любой базовой станции как совокупности трех секторов из W^{opt} будет приводить к тому, что оставшееся множество не будет отвечать определению сети радиодоступа.

2. *Площадь зоны обслуживания S_{serv}^{ij} j -го сектора i -ой базовой станции, находящегося в окружении соседних секторов, будет максимально приближена к зоне покрытия S_{cov}^{ij} этого сектора.*

Зона обслуживания сектора есть часть зоны покрытия, на которой данный сектор обеспечивает уровень сигнала выше, чем любой из окружающих его соседних секторов, т.е. $S_{cov}^{ij} = S_{serv}^{ij} + \Delta S^{ij}$, где ΔS^{ij} – та часть зоны покрытия j -го сектора, где он не обеспечивает преимущественного уровня сигнала. Если вокруг рассматриваемого сектора соседи отсутствуют, то $S_{cov}^{ij} = S_{serv}^{ij}$. В оптимальной сети радиодоступа количество сетевых элементов минимально, значит минимальны области пересечения их зон покрытия, а значит S_{serv}^{ij} максимально приближена к S_{cov}^{ij} .

3. *Эффективность частотно-территориального плана с интерференционной точки зрения будет максимальной, если базовые станции будут располагаться преимущественно в местах концентрации трафика.*

Очевидно, что чем ближе находятся абоненты к базовой станции, тем меньше нужна мощность излучения для обеспечения им заданного уровня качества. С уменьшением мощности излучения улучшаются условия ЭМС.

Таким образом, задача синтеза оптимальной сети радиодоступа представляет собой задачу выбора числа и мест размещения БС и сводится к

перебору всех возможных вариантов. Такой подход имеет экспоненциальную сложность при большом количестве рассматриваемых БС и делает задачу не решаемой. Т.е., необходимо разработать алгоритм, позволяющий получить искомое подмножество W^{opt} из исходного множества W_K за приемлемое время. Применение теории монотонных систем [2] гарантирует полиномиальную сложность алгоритма поиска оптимальной сети.

Для того, чтобы воспользоваться [2], из рассматриваемых элементов необходимо сформировать монотонную систему и ввести уровни их значимости. Тогда, с точки зрения [2], множество W будет соответствовать **определимому множеству**, а искомое подмножество W^{opt} – **ядру** исходного множества W_K .

В качестве **элементов системы** будем рассматривать сектора базовых станций в определенной конфигурации. Состояние элементов и их значимость в рамках рассматриваемой системы будем определять функциями значимости, описывающими наиболее значимые свойства в рамках предшествующего описания и определяемыми зонами покрытия и обслуживания, утилизацией нагрузки секторами базовых станций в определенной конфигурации и наличием частот.

2.1.4. Алгоритм синтеза оптимальной сети

Чтобы применить аппарат теории монотонных систем для разработки конструктивного алгоритма синтеза оптимальной радиосети сотовой подвижной связи, опишем необходимые понятия этой теории в терминах решаемой задачи.

2.1.4.1. Веса элементов сети

Согласно теории монотонных систем, значимость элемента или, другими словами, его вес в рамках системы должен иметь явный физический смысл и являться определяющим параметром при выделении из исходного множества монотонной системы совокупности наиболее связанных элементов, т.е. ядра.

Итак, для любого элемента сети $\alpha_l \in W_K$, где $l = 1 \dots |W_K|$, исходя из его существенных технических характеристик, заданных в виде вектора $\vec{K}_l = \{ \langle x_0, y_0 \rangle, h_l, azmt_l, ant_typ_l, \beta_m^l, \beta_e^l, P_{TRX}^l, L_f^l, L_c^l, N_{TRX}^l \}$, можно определить площадь его

покрытия S_{cov} . Рассмотрев α_l в окружении соседей, можно определить площадь обслуживания S_{serv} элемента α_l .

Принимая во внимание тот факт, что конфигурации одного сектора отличаются друг от друга дополнительными потерями в комбайнере L_c^{ijk} , то при совместном их рассмотрении все комбинации, кроме комбинации с минимальной емкостью, будут иметь нулевую площадь обслуживания S_{serv} . Т.е. исходное множество W_K можно разбить на два подмножества:

$$W_K = H_{S_{serv}=0} \cup H_{S_{serv} \neq 0}, \quad (2.5)$$

где $H_{S_{serv}=0}$ – подмножество конфигураций с нулевой площадью обслуживания, $H_{S_{serv} \neq 0}$ – подмножество конфигураций с ненулевой площадью обслуживания.

Из конфигураций с ненулевой площадью обслуживания можно выделить подмножество комбинаций, имеющих ненулевую уникальную площадь обслуживания S_{uniq} – территорию, на которой необходимый уровень сигнала обеспечивает только данный сектор:

$$H_{S_{serv} \neq 0} = H_{S_{uniq}=0} \cup H_{S_{uniq} \neq 0}. \quad (2.6)$$

Далее, так как конфигурации одного сектора имеют различное предельное количество приемопередатчиков, а, следовательно, и различную предельную емкость, каждому $\alpha_l \in W_K$ можно поставить в соответствие значение максимально допустимого с заданным уровнем блокировок, например 2%, объема обслуживаемого трафика $Traf_{max\ l}$, определенного по формуле Эрланга В:

$$Traf_{max\ l} = \begin{cases} 9 \text{ Эрл при } N_{TRX}^l = 2 - \text{конфигурация 1,} \\ 24.6 \text{ Эрл при } N_{TRX}^l = 4 - \text{конфигурация 2,} \\ 59.1 \text{ Эрл при } N_{TRX}^l = 8 - \text{конфигурация 3,} \end{cases} \quad (2.7)$$

Также, каждому $\alpha_l \in W_K$ можно поставить в соответствие значение $Traf_{real\ l}$ – текущий трафик, приходящийся на элемент α_l , находящийся в окружении соседей и имеющий площадь обслуживания $S_{serv\ l}$. Очевидно, что элементы с нулевой площадью обслуживания будут иметь $Traf_{real} = 0$.

Одним из требований к оптимальной сети, состоящей из элементов множества W^{opt} , является требование, чтобы площадь ее обслуживания не была меньше площади обслуживания исходной избыточной сети, описываемой множеством W_K . Под площадью обслуживания сети здесь будем понимать сумму площадей обслуживания каждого из входящих в нее элементов. Таким образом, разность между площадями обслуживания исходной и «промежуточной» сети, назовем ее *необслуженная площадь* $UnservdArea$, всегда должна оставаться равной нулю! Ситуация появления $UnservdArea > 0$ недопустима, т.к. нарушается принцип сплошного покрытия.

На основе описанных выше свойств сформируем две важные характеристики, присущие каждому элементу α_l из множества W_K , где $l = 1 \dots |W_K|$. Первая характеристика будет описывать удачность расположения данного элемента в рамках рассматриваемой сети, вторая – соответствие емкости данного элемента приходящейся на него с учетом его расположения нагрузке:

$$\pi_l = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha_l \in H_{S_{serv}=0}, \\ \frac{S_{covl} - S_{servl}}{S_{covl}}, & \text{если } S_{uniq} = 0, \\ 0, & \text{если } \alpha_l \in H_{S_{serv} \neq 0} \text{ и } S_{uniq} \neq 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\rho_l = \begin{cases} 0, & \text{если } UnservdArea = 0 \text{ и } Traf_{max\ 1} - Traf_{real\ 1} > 0, \\ -1, & \text{если } UnservdArea = 0 \text{ и } Traf_{max\ 1} - Traf_{real\ 1} \leq 0, \\ -1, & \text{если } UnservdArea > 0 \text{ или } \exists \alpha_{ijk} : Traf_{max\ ijk} - Traf_{real\ ijk} \leq 0, k = 3. \end{cases} \quad (2.9)$$

Поскольку конфигурации сектора представляют собой вариации на тему его емкости, а базовая станция, согласно сказанному ранее, не может иметь менее трех секторов, исключение по критерию расположения может производиться только на уровне базовой станции целиком. Поэтому, оценку имеет смысл производить тоже на уровне базовой станции как совокупности конфигураций трех ее секторов согласно формуле:

$$\lambda_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \forall j, k \in [1,3] \exists ! \pi_{ijk} = 0, \\ \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \pi_{ijk}. \end{cases} \quad (2.10)$$

В общем случае, три из девяти конфигураций трех секторов одной базовой станции будут иметь значение π , отличное от единицы. Шесть комбинации с $S_{serv} = 0$ (по две в каждом секторе) будут иметь значение, равное 1. Если у БС будет иметься хотя бы одна комбинация с $S_{uniq} > 0$, то значение λ этой БС по критерию расположения будет равно 0. Это будет свидетельствовать о том, что данная БС имеет наибольшую значимость и ее удаление заведомо приведет к тому, что показатель *UnservedArea* станет больше 0. Наименьшую же значимость будет иметь БС с наибольшим λ , так как наибольшее значение λ свидетельствует о том, что конфигурации данной БС в совокупности имеют наибольший запас по площади обслуживания.

Второй параметр - ρ_l - характеризует степень соответствия емкости сектора в данной конфигурации приходящейся на него нагрузке. Значение ρ_l элемента α_l будет равно 0 только в случае, когда у него будет иметься запас по емкости по сравнению с приходящимся на него трафиком. Отрицательное значение ρ_l будет свидетельствовать о том, что нагрузка превышает максимально допустимую емкость сектора в данной конфигурации, а значит – данная конфигурация имеет минимальную ценность.

Основной проблемой при рассмотрении сетей сотовой подвижной связи является проблема ограниченности имеющегося частотного ресурса, что приводит к ограничению емкости сети. Попытка увеличить емкости сети за счет увеличения количества приемопередатчиков приводит к появлению интерференции и снижению качества предоставляемых сетью услуг. Введем еще один показатель - Φ , который будет характеризовать достаточность или недостаточность частот для каждого элемента α_l из множества W_K в рамках частотно-территориального плана:

$$\Phi = \begin{cases} 0, & \text{если в рамках ЧТП частот для назначения достаточно,} \\ -1, & \text{если нет.} \end{cases} \quad (2.11)$$

Для удобства данный показатель будем рассматривать на уровне сети в целом, а не на уровне каждого элемента множества W_K . Количество частот,

необходимых для каждого элемента α_l , определяется по количеству приемопередатчиков, требующихся для обслуживания $Traf_{real\ l}$ (табл. 2.1).

Допустимый трафик определяется экспертным путем или рассчитывается по формуле Эрланга В.

Если $Traf_{real\ l} = 0$, то данному элементу требуется ноль передатчиков, а соответственно – ноль частот. Если $0 < Traf_{real\ l} \leq 2,2$ Эрл, то требуется один передатчик, а соответственно – одна частота и т.д.

Алгоритм назначения частот не является целью данной работы. Подобных алгоритмов на сегодняшний день разработано предостаточно, например в [3, 4] и др. При решении задачи отыскания W^{opt} может использоваться любой из них. В настоящей работе использован следующий упрощенный алгоритм назначения частот:

Таблица 2.1

Кол-во приемопередатчиков	Допустимый трафик
0	0
1	2,2
2	9
3	17,5
4	24,6
5	33,7
6	42,1
7	50,6
8	59,1

каждому сектору БС из исходного множества $W_{БС}$ поставим в соответствие диапазон частот, имеющийся у оператора сети и разрешенный для данного сектора (рис. 2.3).

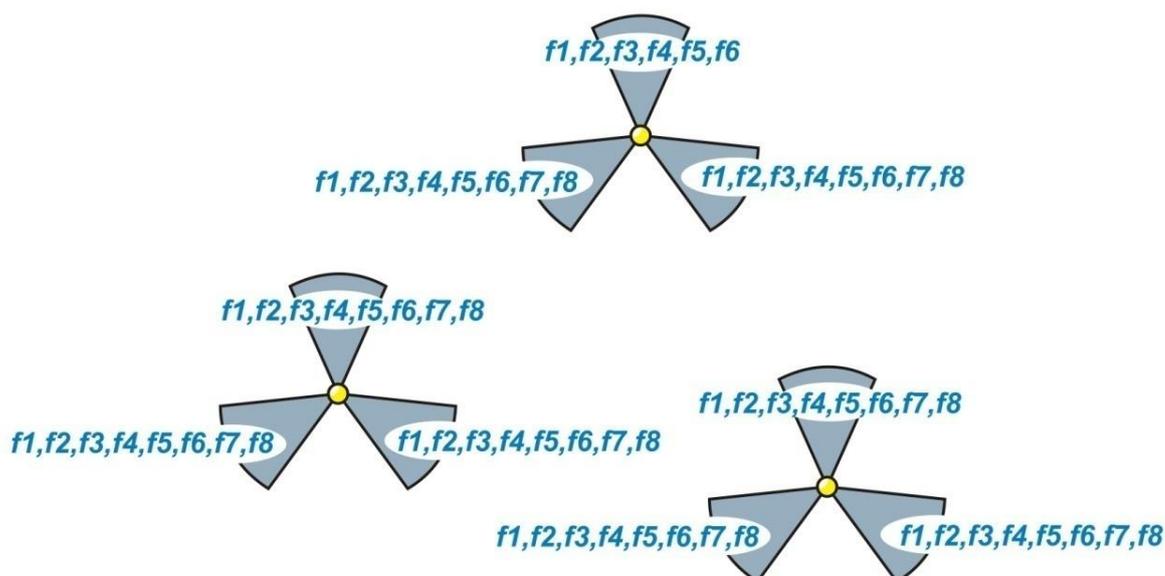


Рис. 2.3. Диапазон разрешенных частот для секторов сети

Зададим значения «сигнал»/«помеха» для соканальной интерференции и интерференции по соседнему каналу. Так как частоты нужны для элементов с ненулевой нагрузкой, будем рассматривать только их. Исходя из данных об уровнях сигнала от этих элементов и заданных значениях «сигнал»/«помеха» для соканальной интерференции и интерференции по соседнему каналу для каждого из рассматриваемых элементов определим по два набора:

1. Набор элементов, для которых запрещено использование соканальных и соседних частот;
2. Набор элементов, для которых запрещено использование соканальных частот.

Схематически это можно изобразить так, как показано на рис. 2.4. Желтым цветом выделен рассматриваемый элемент, темно-зеленым – элементы первого набора, светло-зеленым – элементы второго.

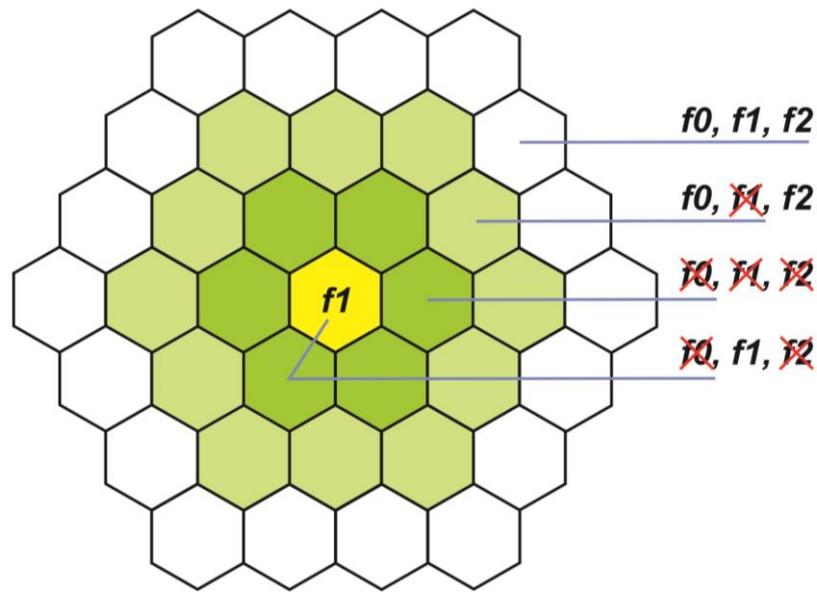


Рис. 2.4. Использование соканальных и соседних частот

Объединив оба набора, получим некоторый кластер для данного элемента. Отранжировав элементы по убыванию размера их кластера, начнем процедуру назначения частотных каналов с элемента с наибольшим размером кластера: зафиксируем первую частоту из присвоенного ему диапазона частот, удалим соседние. Далее, из диапазонов частот всех элементов первого набора исключим назначенную рассматриваемому элементу частоту, а также соседние номиналы, если таковые имеются.

Таблица 2.2

Элемент	Набор	Разрешенные частоты						
1	0	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
2	1	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
3	1	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
4	1	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
5	1	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
6	1	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
7	1	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
8	2	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...
9	2	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>	<i>f5</i>	<i>f6</i>	...

Таблица 2.2 (окончание)

Элемент	Набор	Разрешенные частоты						
10	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
11	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
12	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
13	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
14	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
15	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
16	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
17	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
18	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...
19	2	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...

Для элементов второго набора исключим только соканальные частоты. После этого зафиксируем следующую частоту из присвоенного рассматриваемому элементу диапазона частот и процедуру исключения повторим (табл. 2.2).

И так до тех пор, пока не будут назначены все необходимые данному элементу частоты. Если удастся назначить частоты для всех приемопередатчиков, перейдем к следующему в отранжированном списке элементу. Назначение частот будем проводить либо до полного исчерпания отранжированного списка элементов, и тогда $\Phi = 0$, либо до того момента, когда для какого-то элемента не окажется частот для назначения. В этом случае $\Phi = -1$. Блок-схема рассмотренного алгоритма показана на рис. 2.5.

Определив существенные с точки зрения решаемой задачи характеристики λ , ρ и Φ , перейдем к следующему этапу: рассмотрим, что происходит с π , λ , ρ и Φ при исключении из множества W_K какого-либо элемента.

При удалении произвольного α_l из множества W_K обслуживаемая им территория $S_{serv l}$ перераспределится между оставшимися элементами множества $W_K \setminus \{\alpha_l\}$. При этом запас по площади обслуживания у элементов, разделивших между собой площадь обслуживания исключенного элемента, уменьшится, у остальных – никак не изменится. Аналогично произойдет и с нагрузкой: трафик, генерируемый на территории обслуживания исключенного элемента, перераспределится вместе с территорией обслуживания, это приведет к увеличению нагрузки у элементов, разделивших между собой площадь обслуживания исключенного элемента, у остальных – никак не изменится. Исходя из формул (2.8)-(2.10), можно заключить, что значения характеристик π , λ и ρ для элементов множества $W_K \setminus \{\alpha_l\}$ либо уменьшатся, либо останутся неизменными.

По мере исключения элементов из рассматриваемого множества W_K нагрузка на остающиеся элементы будет только расти. Как следствие, для обслуживания этой нагрузки с заданным уровнем блокировок будет требоваться все больше приемопередатчиков, а, следовательно, больше частот. Т.е. будет расти вероятность нехватки имеющегося диапазона частот для создания частотного плана сети. В какой-то момент частот не хватит и, согласно формуле (2.11) значение Φ станет отрицательным.

Таким образом, характеристики π , λ , ρ и Φ в полной мере соответствуют свойству монотонности (1) из [2], т.е. мы имеем монотонную систему.

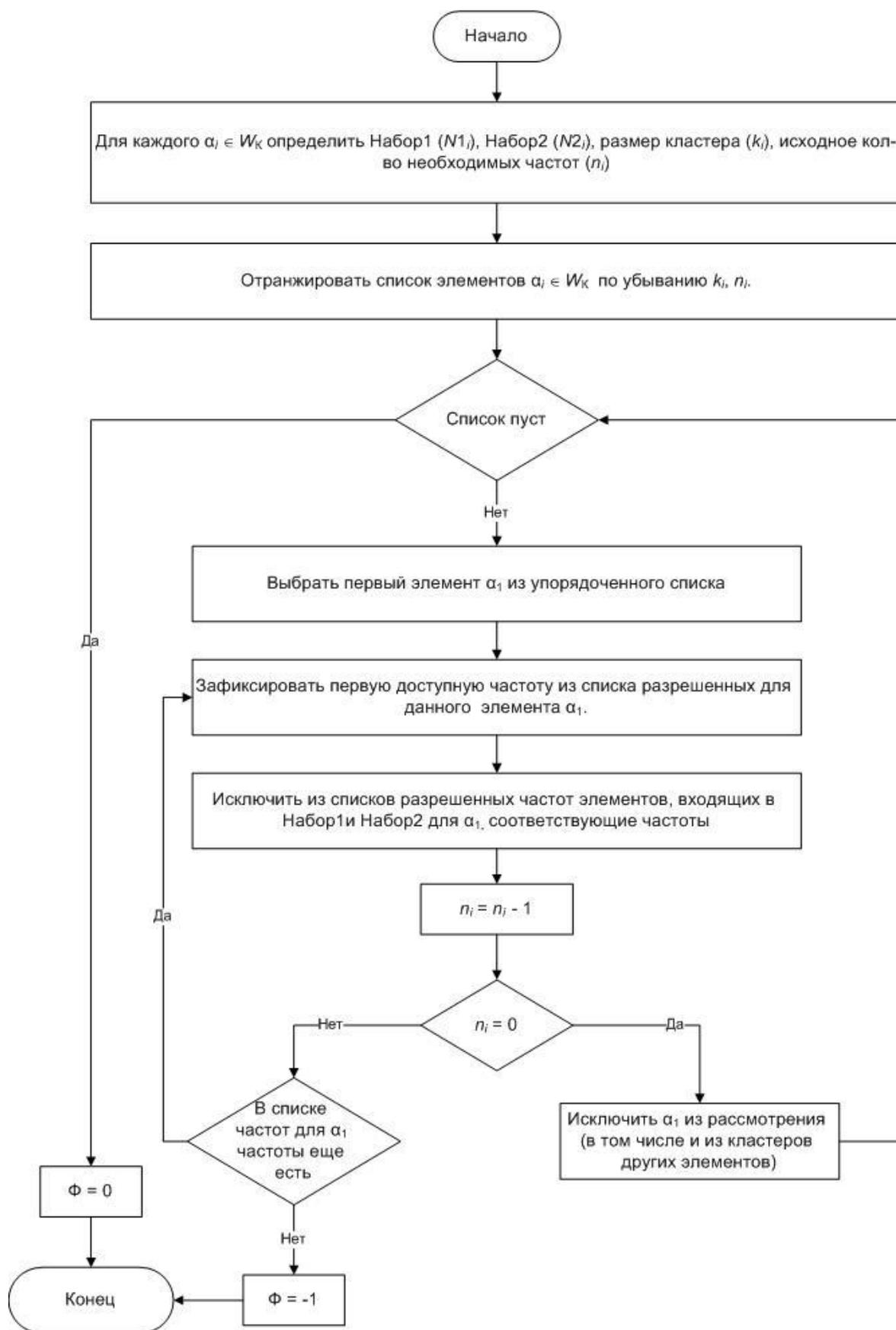


Рис. 2.5. Блок-схема алгоритма назначения частот

2.1.4.2. Построение определимого множества

В соответствии с [2] зададимся вопросом о выделении из рассматриваемой системы W_K некоторой подсистемы, обладающей требуемыми свойствами, т.е. ядра - множества максимально связанных элементов, объединенных своей внутренней организацией в систему, выполняющую функцию обеспечения сплошного радиопокрытия рассматриваемой территории с предоставлением услуг связи с заданным качеством.

Согласно выводам работы [1] и в соответствии с формулой (2.10) для расчета λ нашей целью является \oplus -ядро. Поскольку все ядра системы входят в определимое множество H_+^* , сначала необходимо выделить именно его. Для этого определим понятие *определяющей последовательности*. В рамках решаемой задачи его требуется несколько изменить.

Итак, будем считать последовательность $\bar{\alpha}$ элементов множества W_K *определяющей*, если в последовательности $\Delta_{\bar{\alpha}}$ существует подпоследовательность множеств

$$\Gamma_{\bar{\alpha}}^+ = \langle \Gamma_0^+, \Gamma_1^+, \dots, \Gamma_R^+ \rangle,$$

такая, что

- а) вес λ_i любой совокупности элементов из последовательности $\bar{\alpha}$, принадлежащих одной БС_{*i*}, входящей во множество Γ_j^+ , но не входящей во множество Γ_{j+1}^+ , строго больше максимального λ совокупности элементов одной БС из Γ_{j+1}^+

и

$$\text{для любого } \alpha_i \in \Gamma_{j+1}^+ \quad \rho(\alpha_i) = 0$$

и

$$\text{в рамках } \Gamma_{j+1}^+ \quad \Phi = 0.$$

- б) во множестве Γ_R^+ не существует такого собственного подмножества L , чтобы выполнялось условие:

$$\max_{\alpha \in \Gamma_R^+} \lambda(\pi(\alpha)) \Gamma_R^+ > \max_{\alpha \in L} \lambda(\pi(\alpha)) L$$

или

для любого $\alpha_i \in L$ $\rho(\alpha_i) = 0$

или

в рамках Γ_{j+1}^+ $\Phi = 0$.

Тогда подмножество H_+^* множества W_K будет называться *определимым*, если существует определяющая последовательность и $\bar{\alpha}_+$, такая, что

$$H_+^* = \Gamma_R^+.$$

2.1.4.3. Выделение ядра

После получения определимого множества H_+^* из него необходимо выделить ядро минимальной мощности. Это и будет искомое W^{opt} , заданное в (2.1). Поиск ядра состоит в попытке исключить из определимого множества элементы с $\lambda_i > 0$. При этом не должны нарушаться ограничения по емкости и наличию частот, т.е. не должно оставаться элементов с $\rho_i < 0$ или же Φ не должно становиться меньше 0, а также не должно появляться необслуженной территории. Порядок исключения элементов при поиске ядра совпадает с порядком при выделении определимого множества. Разница состоит в том, что при невозможности удалить очередной элемент поиск не прекращается, а продолжается, но только для оставшихся элементов, для которых попытка удаления еще не производилась. После того, как будут перебраны все возможные варианты исключения элементов, остается исключить элементы с $S_{serv} = 0$ и искомое W^{opt} будет получено.

2.2. Синтез оптимальной сети связи

Исходя из свойств, описанных в п. 2.1.4.1, последовательностей выделения определимого множества (п. 2.1.4.2) и ядра (п. 2.1.4.3), конструктивный алгоритм синтеза оптимальной сети радиодоступа необходимо проводить в два этапа:

- этап I: отыскание определимого множества H_+ ;
- этап II: выделение \oplus -ядра минимальной мощности из определимого множества H_+ .

2.2.1. Этап I: отыскание определимого множества H_+

Процедура выделения определимого множества H_+ из исходной совокупности W_K аналогична процедуре выделения ядер (ПВЯ), описанной в [2].

Вместе с тем, из-за изменения способа определения значимости элементов сети, сформулированных в виде (2.8)-(2.11), требуется внести некоторые коррективы. Рассмотрим модифицированную процедуру подробнее.

Идея классической ПВЯ состоит в сужении исходного множества W до совокупности максимально связанных элементов H_+ , $H_+ \subseteq W$ путем последовательного исключения наименее значимых для функционирования системы в целом элементов, начиная с наихудшего, т.е. имеющего максимальный вес πW . Исключаемые элементы последовательно формируют определяющую последовательность $\bar{\alpha}_+$.

Исходные уровни значимости элементов – веса – определяются начальным весовым набором ΠW . После очередного исключения наименее значимого элемента из системы связи между оставшимися элементами изменяются, в результате чего меняются уровни их значимости $\Pi^+ H$.

Элементы исключаются группами – «кольцами», по несколько штук за один шаг процедуры (рис. 2.6). «Кольца» формируются в случае, если после удаления очередного «наихудшего» (имеющего максимальный вес из совокупности $\{\pi^+ H(\alpha) \mid \alpha \in H\}$, $H \subseteq W$) из входящих в текущее множество $H \subseteq W$ элементов среди оставшихся во множестве H/α элементов появляются такие $\gamma \in H/\alpha$, которые оказываются «хуже наихудшего» (веса которых оказываются больше веса удаленного элемента: $\pi^+ H/\alpha(\gamma) > \pi^+ H(\alpha)$). В этом случае «наихудший» элемент вместе с элементами, оказавшимися «хуже наихудшего» после его удаления, образуют очередное «кольцо».

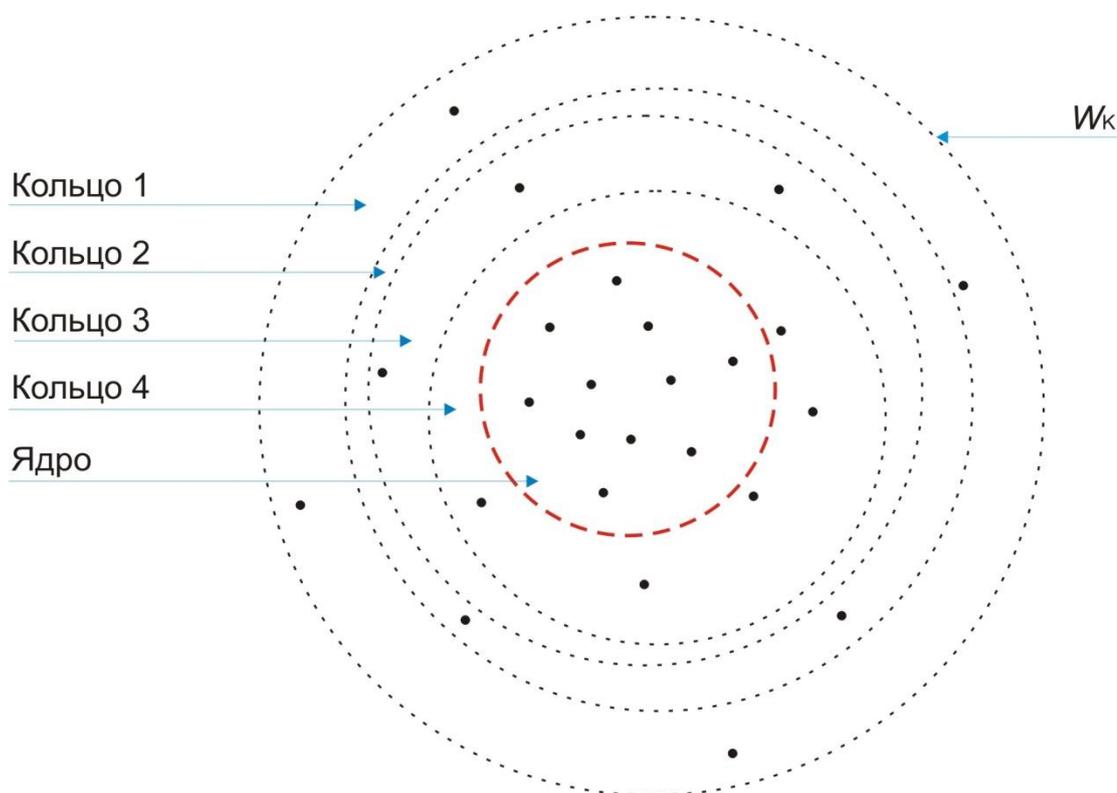


Рис. 2.6. Исключение колец в процедуре выделения ядер

Таким образом, в классической ПВЯ в очередное «кольцо» попадают:

- «наихудший» из входящих в текущее множество $H \subseteq W$ элемент α : $\pi^+H(\alpha) \mid \alpha \in H = \max \Pi^+H$;
- элементы γ , чьи веса после удаления «наихудшего» элемента стали больше его веса: $\gamma \in H/\alpha$: $\pi^+H/\alpha(\gamma) > \pi^+H(\alpha)$;

В последнее «кольцо» (являющееся «кругом» на рис. 2.6) войдут все оставшиеся элементы текущего множества $H \subseteq W$, исходное множество W исчерпается, а определяющая последовательность $\bar{\alpha}_+$ будет считаться построенной. Совокупность элементов, образующих последнее «кольцо», и будет представлять собой, в соответствии с [2], определенное множество H_+ – самое большое \oplus -ядро системы.

Для применения описанной ПВЯ к задаче выделения определенного множества H_+ из исходной совокупности W_K необходимо модифицировать процедуру выделения ядер в смысле правил формирования «колец» элементов, исключаемых на очередном шаге, как это было предложено в [1], а также исходя

из измененного способа определения значимости элементов сети и физического смысла.

Физический смысл построения оптимальной сети радиодоступа, которая, по условию, должна содержать минимальное количество элементов, состоит в последовательном исключении наименее ценных элементов из исходного избыточного множества. Т.к. по условию базовая станция не может иметь менее трех секторов, а именно базовые станции обеспечивают покрытие в сети сотовой связи, то удаление возможно только целиком на уровне БС, т.е. сразу всех элементов, принадлежащих этой БС. После исключения наименее ценной БС вся территория ее обслуживания перераспределится между секторами соседних БС, соответственно, перераспределится и нагрузка. Перераспределение нагрузки может привести к ситуации, когда какой-либо сектор, принявший часть нагрузки от удаленной БС, или их группа не смогут обслужить возросшую нагрузку с заданным уровнем качества, т.е. появится необслуженный трафик. Для того, чтобы иметь возможность уменьшить количество БС в сети, но не нарушить при этом качество обслуживания, потребуется увеличить емкость перегруженных секторов, т.е. исключить те конфигурации, емкость которых недостаточна. Это не должно привести к «пропаданию» сектора БС (удаление последней конфигурации сектора), к появлению необслуженной территории из-за уменьшения площади покрытия сектора при увеличении его емкости, а также не должна возникнуть ситуация, когда имеющихся частот не хватит для назначения в сектора, где была увеличена емкость.

Таким образом, в процессе выделения ядра в очередное «кольцо» должны войти:

- «наихудшая» БС_{*i*} с точки зрения критерия λ как совокупность элементов α_{ijk} ($j \in [1;3]$, $k \in [1;3]$) из текущего множества $H \subseteq W_K$, представляющих собой конфигурации трех секторов этой БС: $\lambda_i(\alpha_{ijk}) = \max_{\alpha \in H} \lambda(\pi(\alpha))H$;
- все элементы γ : $\gamma \in H/\alpha_{ijk}$, у которых после удаления «наихудшей» БС вес ρ стал равен -1: $P = \{ \gamma \mid \rho(\gamma) = -1 \}$;

- все элементы множества H , оставшиеся после удаления совокупности элементов α_{ijk} и всех элементов $\gamma \in P$, в случае, если $H / \{\alpha_{ijk}, \bar{\gamma}\} : \Phi = -1$.

Схематически алгоритм построения «кольца» изображен на рис. 2.7.

Понятие определимого множества в [2] вводится с помощью предположения о существовании особых подпоследовательностей элементов изучаемой системы, названных определяющими $\bar{\alpha}_+$ ($\bar{\alpha}_-$)-последовательностями. Вопрос существования определяющих последовательностей решается конструктивно, в виде процедур-алгоритмов. Основные свойства определяющей последовательности, построенной по правилам процедуры и исчерпывающей все множество W , гарантируются теоремой.

Для выделения из исходного множества W_K определимого множества H_+ необходимо построить соответствующую определяющую последовательность $\bar{\alpha}_+$ относительно совокупности наборов весов $\{\Pi^+ H | H \subseteq W_K\}$ с учетом ограничений на ρ и Φ .

Предлагаемая процедура построения последовательности $\bar{\alpha}_+$ задается в виде правил генерирования упорядоченного ряда упорядоченных множеств $\langle \bar{\beta}_j \rangle$ (последовательностей), где j изменяется от нуля до некоторого p , которое определяется автоматически правилами процедуры, а элементы каждой последовательности $\bar{\beta}_j$ выбираются из множества W_K (скобки \langle и \rangle используются для обозначения упорядоченного множества, в данном случае - упорядоченного множества упорядоченных множеств $\bar{\beta}_j$).

Выстраиваемый этим правилом ряд $\langle \bar{\beta}_j \rangle$ формирует числовую последовательность порогов $\langle \varepsilon_j \rangle$ и последовательность множеств $\langle \Gamma_j \rangle$. В свою очередь последовательность порогов управляет переходами в цепочке $\langle \bar{\beta}_j \rangle$ от $\bar{\beta}_{j-1}$ к $\bar{\beta}_j$, а последовательность $\langle \Gamma_j \rangle$ заканчивается множеством, которое является определимым.

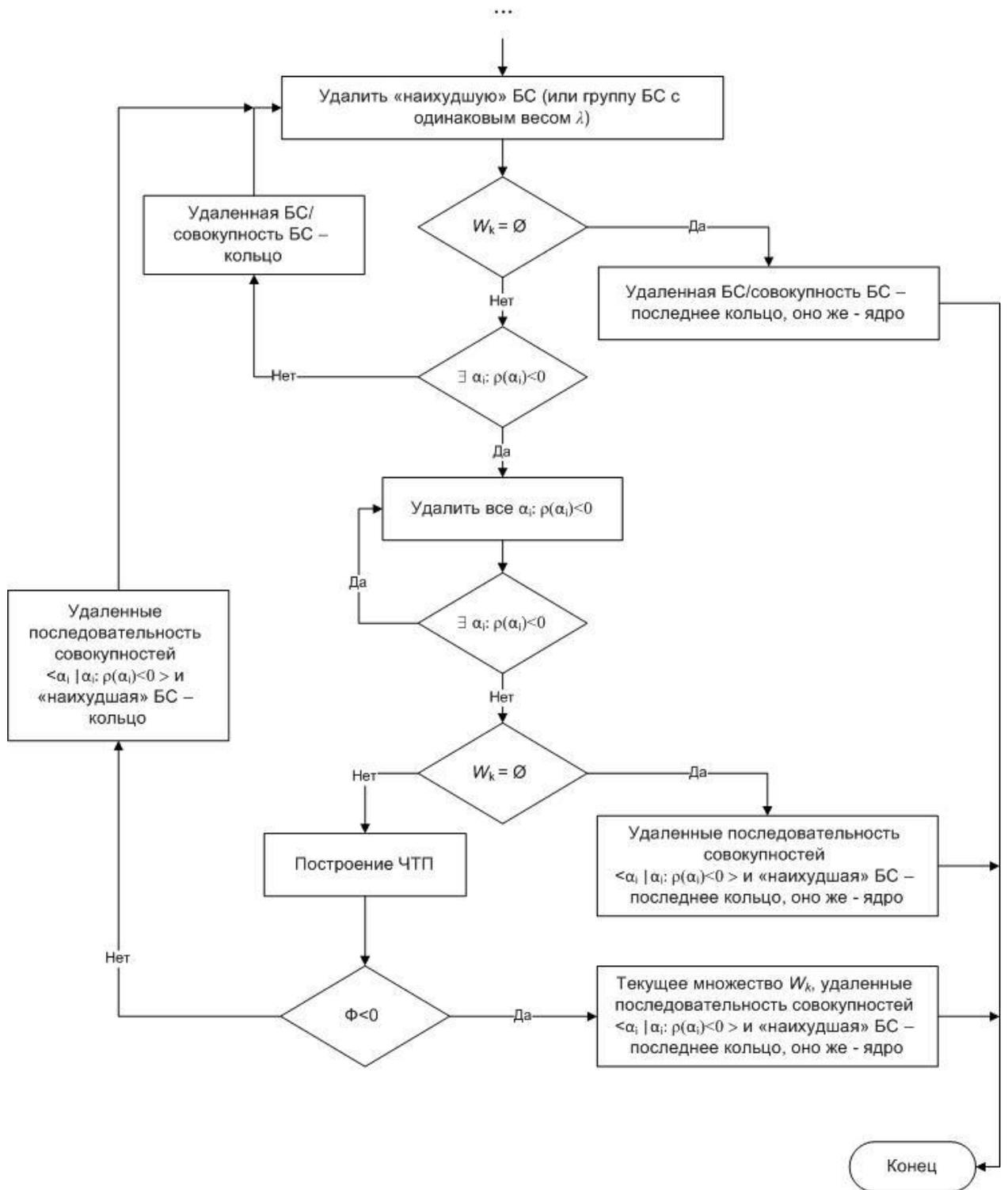


Рис. 2.7. Блок-схема алгоритма построения «кольца»

В описании правила используется операция расширения некоторой последовательности $\bar{\beta}$ добавлением к ней другой последовательности $\bar{\gamma}$. Эта операция символически записывается в виде: $\bar{\beta} \leftarrow \langle \bar{\beta}, \bar{\gamma} \rangle$.

Правило построения последовательности $\bar{\alpha}_+$ всех элементов множества W_K описывается в рекуррентной форме по шагам. Каждый шаг состоит из двух этапов.

Нулевой шаг

Этап I.

Во множестве W_K находится совокупность элементов $\bar{\mu}_0$, принадлежащих одной БС, такая, что $\lambda(\bar{\mu}_0) = \max_{\delta \in W_K} \lambda(\pi(\delta)) W_K$.

Положим $\varepsilon_0 = \lambda^{+} W_K(\bar{\mu}_0)$, $\bar{\alpha}_+ = \langle \bar{\mu}_0 \rangle$ и множество $\Gamma_0 = W_K$.

Выделяется подмножество элементов γ , таких что $\rho W_K / \bar{\alpha}_+(\gamma) = -1$.

Полученное множество обозначим $\bar{\gamma}$. Положим последовательность $\bar{\beta}_0 = \bar{\gamma}$.

Этап II.

Строится рекуррентная процедура расширения последовательностей $\bar{\alpha}_+$ и $\bar{\beta}_0$. Фиксируем элементы последовательности $\bar{\beta}_0$. Расширяем последовательность $\bar{\alpha}_+$ зафиксированными в этот момент элементами последовательности $\bar{\beta}_0$. В соответствии с символической записью операции расширения последовательности $\bar{\alpha}_+$ в каждый момент фиксации t производится операция

$$\bar{\alpha}_+ \leftarrow \langle \bar{\alpha}_+, \beta_0(t) \rangle$$

Пусть все имеющиеся элементы $\bar{\beta}_0$ уже зафиксированы. Тогда последовательность $\bar{\alpha}_+$ имеет вид:

$$\bar{\alpha}_+ \leftarrow \langle \bar{\alpha}_+, \beta_0(1), \beta_0(2), \dots, \beta_0(i) \rangle .$$

В момент фиксации элементов $\beta_0(1) - \beta_0(i)$ одновременно с предписанной выше операцией расширения $\bar{\alpha}_+$ принимается решение о дальнейшем расширении или прекращении расширения последовательности $\bar{\beta}_0$.

Проверяется условие: во множестве $W_K/\bar{\alpha}_+$ есть такие элементы γ , для которых $\rho W_K/\bar{\alpha}_+(\gamma) = -1$.

В случае, когда условие выполняется, последовательность $\bar{\beta}_0$ расширяется: множество элементов γ из $W_K/\bar{\alpha}_+$, выделенных указанным условием, добавляется в последовательность $\bar{\beta}_0$ в соответствии с формулой $\bar{\beta}_0 \leftarrow \langle \bar{\beta}_0, \bar{\gamma} \rangle$, и далее рекурсия – вновь осуществляется этап II.

В случае, когда условие не выполняется, последовательность $\bar{\beta}_0$ не расширяется, и последним зафиксированным элементом в последовательности $\bar{\beta}_0$ считается элемент $\beta_0(i)$. Далее делается проверка, является ли множество $W_K/\bar{\alpha}_+$ пустым. Если является, то Γ_0 - искомое определимое множество. Если не является, то для совокупности элементов множества $W_K/\bar{\alpha}_+$ определяется Φ . Если $\Phi = -1$, то Γ_0 - искомое определимое множество, в противном случае переходим к рекуррентному шагу.

Рекуррентный шаг

Этап I.

Пусть закончена фиксация всех элементов последовательности $\bar{\beta}_{j-1}$. К этому моменту построена некоторая последовательность $\bar{\alpha}_+$. Рассматривается множество $W_K/\bar{\alpha}_+$. Находится такая совокупность элементов из $W_K/\bar{\alpha}_+$, принадлежащих одной БС, на которой достигается максимум веса λ . Найденная совокупность элементов обозначается $\bar{\mu}_j$.

Таким образом, $\lambda(\bar{\mu}_j) = \max_{\delta \in W_K/\bar{\alpha}_+} \lambda(\pi(\delta)) W_K/\bar{\alpha}_+$.

Положим $\varepsilon_j = \lambda W_K/\bar{\alpha}_+(\bar{\mu}_j)$, множество $\Gamma_j = W_K/\bar{\alpha}_+$, а затем дополним последовательность $\bar{\alpha}_+$ совокупностью элементов $\bar{\mu}_j$, т.е.

$$\bar{\alpha}_+ \leftarrow \langle \bar{\alpha}_+, \bar{\mu}_j \rangle.$$

Если после этого $W_K / \bar{\alpha}_+ = \emptyset$, то Γ_j - искомое определимое множество. Если нет, то так же, как это осуществлялось на нулевом шаге, выделяется подмножество элементов γ из $W_K / \bar{\alpha}_+$, таких что $\rho W_K / \bar{\alpha}_+(\gamma) = -1$. Множество обозначается через $\bar{\gamma}$. Множество $\bar{\beta}_j$ полагается равным $\bar{\gamma}$.

Этап II.

По аналогии со вторым этапом нулевого шага второй этап рекуррентного шага описывается сам, как рекуррентная процедура. На данном этапе также используется правило расширения последовательностей $\bar{\alpha}_+$ и $\bar{\beta}_j$.

Пусть зафиксированы все элементы $\bar{\beta}_j$. Тогда последовательность $\bar{\alpha}_+$ имеет вид:

$$\bar{\alpha}_+ = \langle \bar{\alpha}_+, \bar{\mu}_j, \beta_j(1), \dots, \beta_j(i) \rangle,$$

где $\bar{\alpha}_+$ – последовательность $\bar{\alpha}_+$, сложившаяся к моменту фиксации всех элементов $\bar{\beta}_{j-1}$, или, по-другому, последовательность $\bar{\alpha}_+$ перед j -ым шагом. Последнее равенство

соответствует символической записи операции расширения последовательностей

$$\bar{\alpha}_+ \leftarrow \langle \bar{\alpha}_+, \beta_j(1), \beta_j(2), \dots, \beta_j(i) \rangle$$

в случае, если $\bar{\alpha}_+$ внутри скобок есть последовательность $\langle \bar{\alpha}_+, \bar{\mu}_j \rangle$.

Рассматриваются элементы $\beta_j(1) - \beta_j(i)$ последовательности $\bar{\beta}_j$. В момент фиксации принимается решение о дальнейшем расширении или прекращении расширения последовательности $\bar{\beta}_j$. Для этого проверяется условие: во множестве $W_K / \bar{\alpha}_+ \exists$ элементы γ , для которых $\rho W_K / \bar{\alpha}_+(\gamma) = -1$.

По аналогии с нулевым шагом, когда условие выполняется, последовательность $\bar{\beta}_j$ расширяется. Последовательность $\bar{\beta}_j$ расширяется в соответствии с формулой $\bar{\beta}_j \leftarrow \langle \bar{\beta}_j, \bar{\gamma} \rangle$, и далее вновь действуем в соответствии с правилами этапа II рекуррентной процедуры расширения последовательности $\bar{\alpha}_+$.

В случае, когда условие не выполняется, последовательность $\bar{\beta}_j$ не расширяется, и последним зафиксированным элементом в последовательности $\bar{\beta}_j$ считается элемент $\beta_j(i)$.

Если при этом $W_K/\bar{\alpha}_+ = \emptyset$, то Γ_j - искомое определимое множество, в противном случае для совокупности элементов множества $W_K/\bar{\alpha}_+$ определяется Φ . Если $\Phi = -1$, то Γ_j - искомое определимое множество, в противном случае переходим к этапу I рекуррентного шага и так до тех пор, пока не исчерпается множество W_K .

Блок-схема описанной процедуры выделения ядер приведена на рис. 2.8.

Приведенная модифицированная процедура выделения ядер завершает **этап I** конструктивного алгоритма синтеза оптимальной сети радиодоступа. Она позволяет эффективно, без применения перебора найти самое большое ядро – определимое множество N_+ . Отыскать отдельное ядро, включенное строго в определимое множество (если такое имеется), с помощью построения определяющей последовательности не представляется возможным. Поэтому для выделения из найденного определимого множества N_+ \oplus -ядра минимальной мощности, необходимо осуществить **этап II** конструктивного алгоритма синтеза искомой сети радиодоступа.

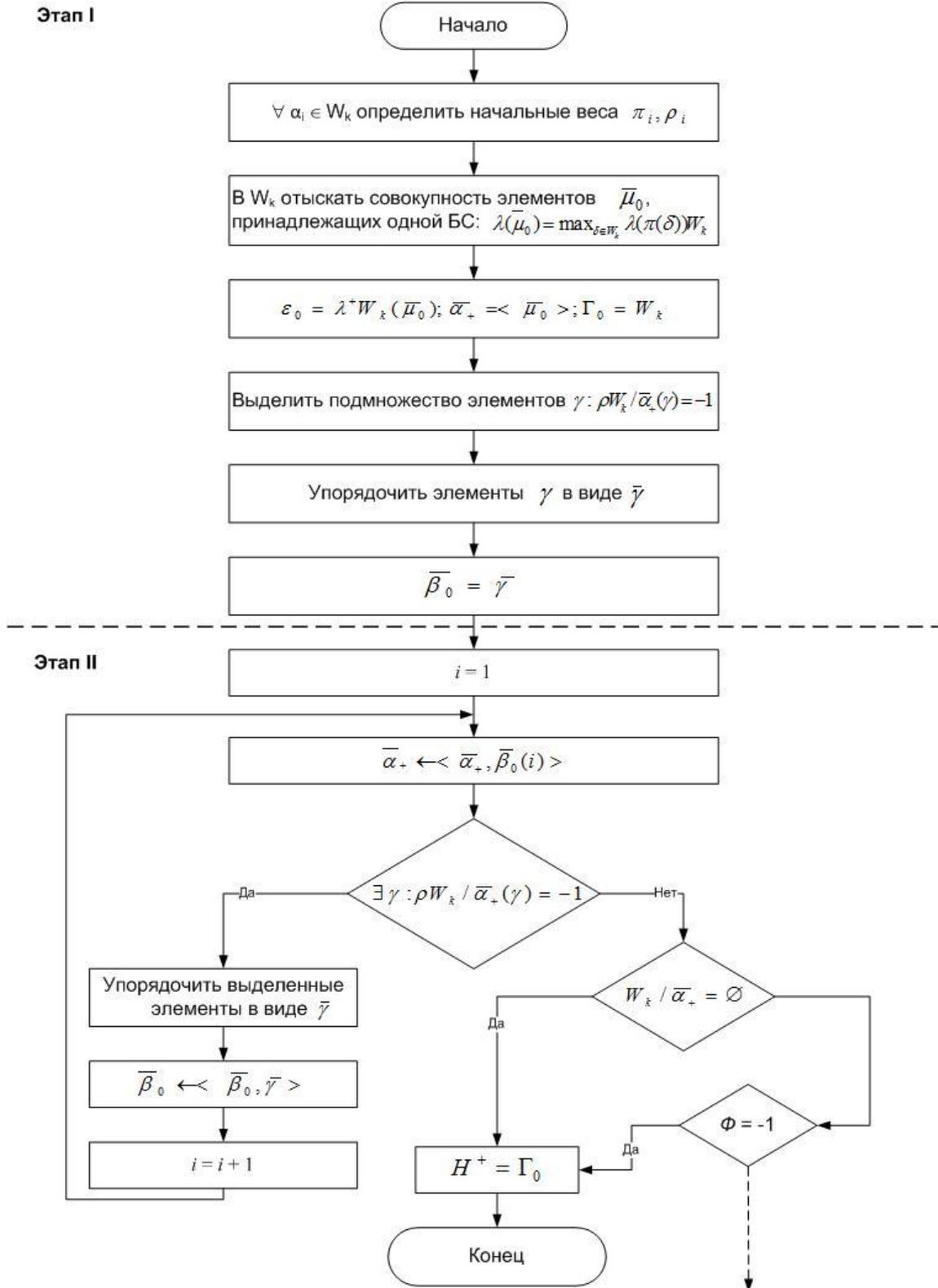
Нулевой шаг

Рис. 2.8. Блок-схема модифицированной процедуры выделения ядер (начало)

Рекуррентный шаг

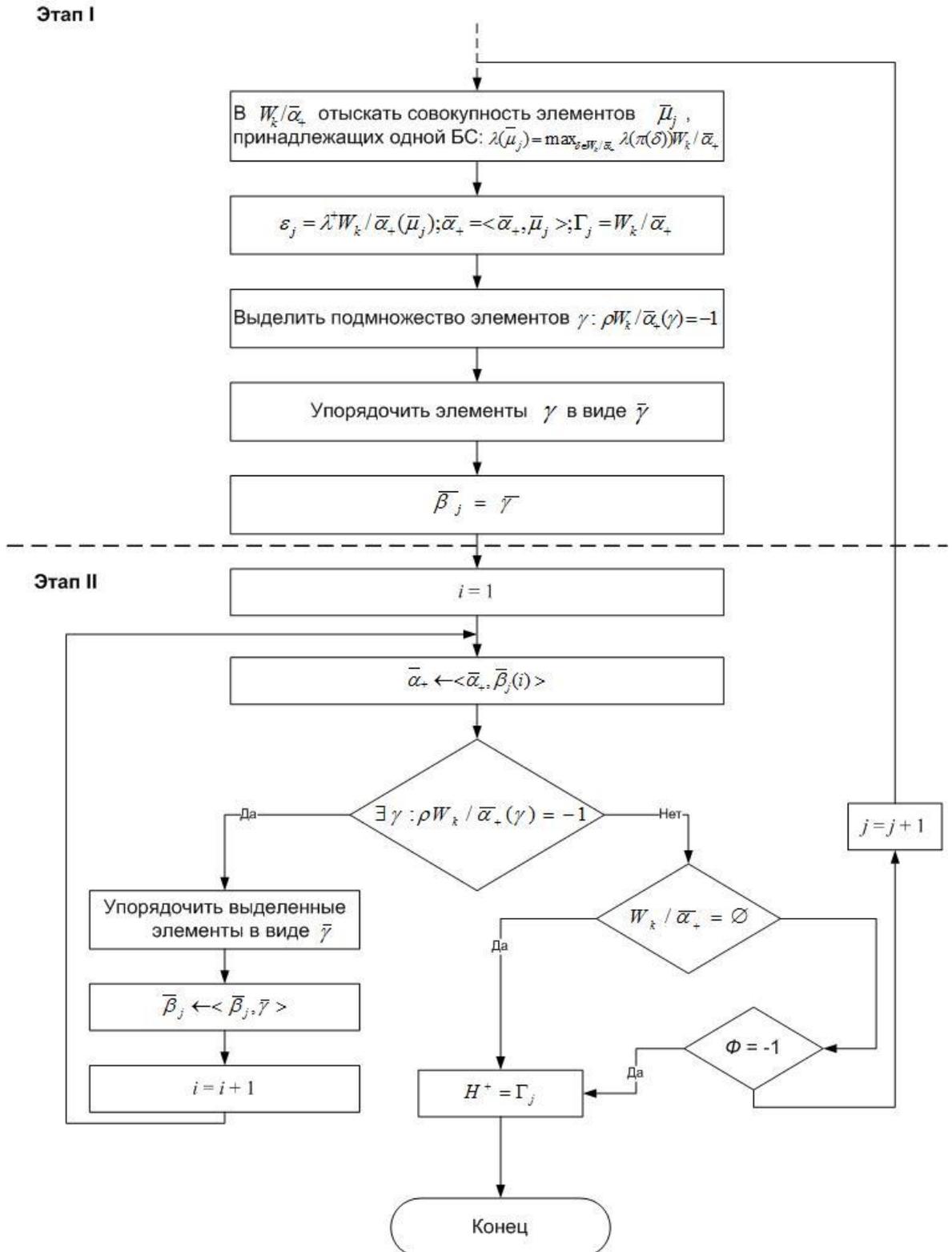


Рис. 2.8. Блок-схема модифицированной процедуры выделения ядер (окончание)

2.2.2. Этап II. Выделение \oplus -ядра минимальной мощности из определимого множества N_+

Согласно условиям задачи исходное множество W_K соответствует некоторому большому числу БС, установленных во все потенциально возможные места на заданной территории. Число этих БС значительно (в несколько раз) превышает число БС, реально необходимых для обеспечения радиопокрытия заданной территории с требуемым качеством.

В результате применения модифицированной ПВЯ к исходному множеству W_K было выделено определимое множество N_+ . Очевидно, что мощность N_+ значительно меньше мощности исходного множества W_K .

Таким образом, область поиска совокупности БС, образующих оптимальную по критерию (2.1) сеть радиодоступа, значительно сужена. Однако, как было отмечено в п. 2.1.4.2, множество N_+ является самым большим положительным ядром системы W_K , и наша задача на данном этапе состоит в выделении из множества N_+ \oplus -ядра минимальной мощности (если такое имеется), соответствующего такой сети радиодоступа.

Так как теория монотонных систем [2] не содержит эффективного алгоритма поиска указанного ядра, а также с учетом того, что область поиска требуемой совокупности БС значительно сужена, и множество N_+ имеет относительно небольшую мощность, используем для выделения искомого \oplus -ядра направленный перебор множества N_+ .

Рассмотрим, что представляет из себя полученное на этапе I определимое множество N_+ . С точки зрения веса λ возможны два варианта:

1. В рамках N_+ не существует ни одной БС с весом $\lambda > 0$. Это свидетельствует о том, что каждая из БС имеет уникальную зону обслуживания, т.е. территорию, на которой присутствует сигнал только от данной БС. Исключение любой БС заведомо приведет к уменьшению площади обслуживания сети связи, что недопустимо. Вместе с тем, организация алгоритма на этапе I гарантирует, что сектора всех БС в рамках N_+ имеют достаточную для обслуживания нагрузки емкость, а частотного ресурса

достаточно для назначения частот по всем приемопередатчикам. В этом случае искомое ядро минимальной мощности получается из N_+ удалением всех элементов с $S_{serv} = 0$.

2. В рамках N_+ существует одна или несколько БС с $\lambda > 0$. Только эти БС могут быть кандидатами на исключение, т.к. они не имеют уникальной зоны обслуживания. Ограничение на их исключение может быть либо емкостное, либо частотное. Таким образом, задача выделения из множества N_+ ядра минимальной мощности сводится к последовательности попыток исключения БС, не имеющих уникальной зоны покрытия, чье удаление не приводило бы к нарушению емкостных и/или частотных ограничений.

Для решения задачи, описанной в пункте 2, можно использовать алгоритм, аналогичный применяемому на этапе I, с той лишь разницей, что невозможность исключения очередной БС не должна приводить к остановке алгоритма. В этом случае вес «проблемной» БС принудительно обнуляется и она более не влияет на процедуру поиска «наихудшего» элемента – кандидата на удаление. В итоге мы получим некоторое подмножество множества N_+ , в котором веса λ всех БС будут равны нулю, что полностью соответствует пункту 1 настоящего раздела.

Блок-схема алгоритма выделение \oplus -ядра минимальной мощности из определимого множества N_+ представлена на рис. 2.9.

Приведенная выше процедура выделения \oplus -ядра минимальной мощности из определимого множества N_+ завершает этап II конструктивного алгоритма синтеза оптимальной сети радиодоступа.

Выделенная совокупность базовых станций, входящих в синтезированное \oplus -ядро минимальной мощности N^{opt} , отвечает характеристикам оптимальной сети радиодоступа в соответствии с критерием (2.1). Данная совокупность обладает минимальной мощностью по сравнению с любыми другими совокупностями базовых станций, образующих сеть радиодоступа, что гарантируется правилами конструктивного алгоритма синтеза указанного \oplus -ядра.

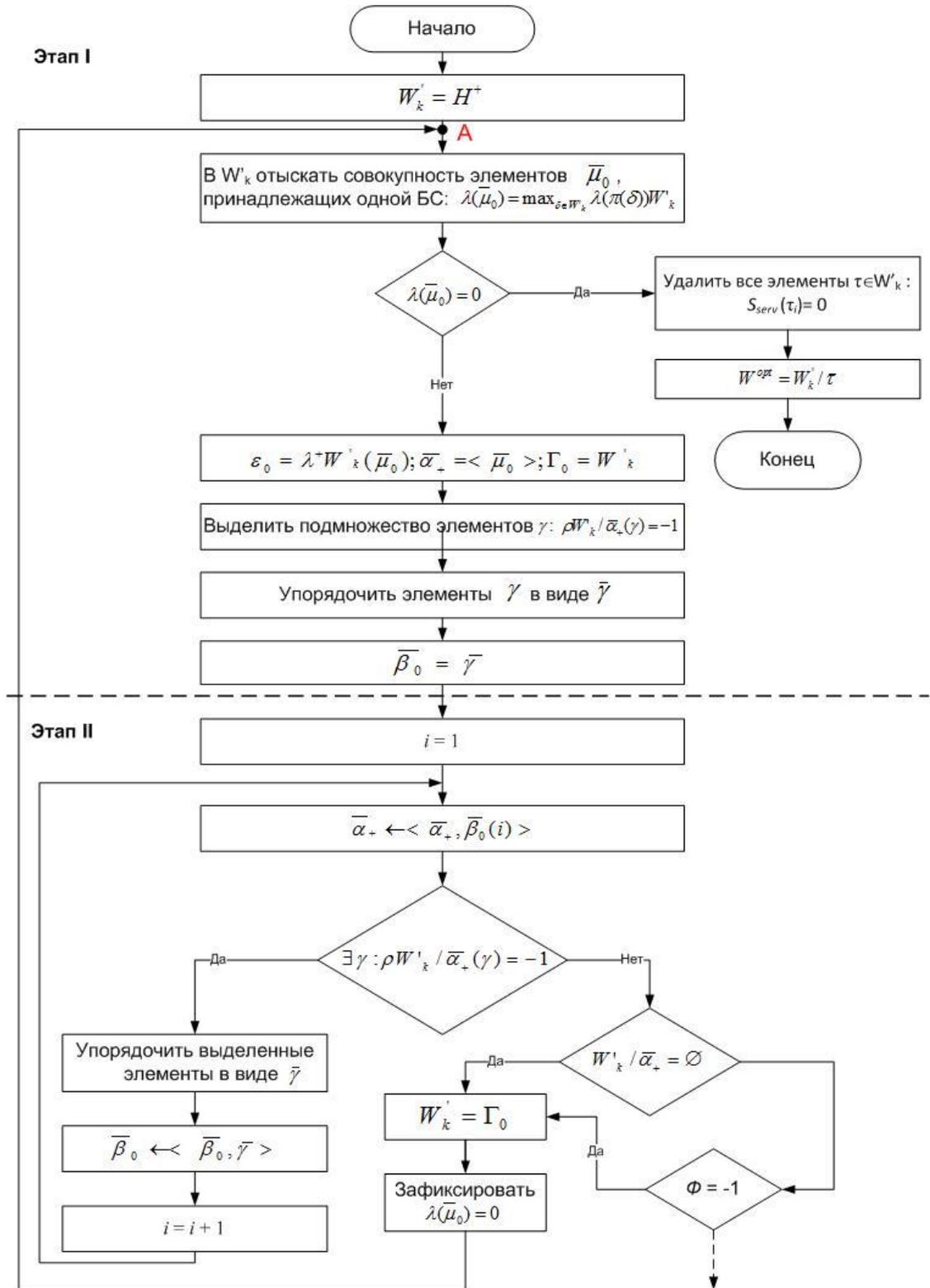
Нулевой шаг

Рис. 2.9. Блок-схема алгоритма выделение \oplus -ядра минимальной мощности из H_+
(начало)

Рекуррентный шаг

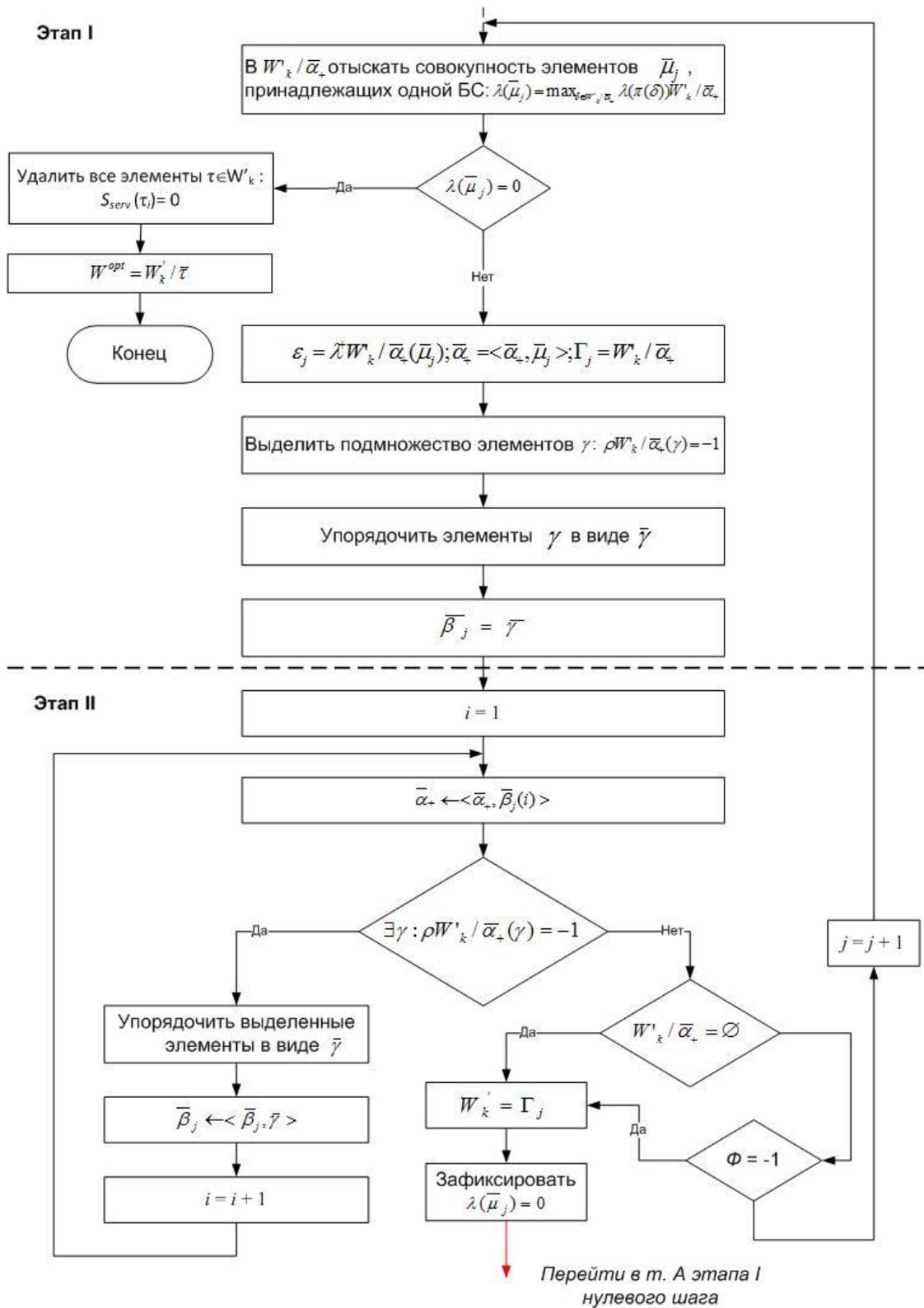


Рис. 2.9. Блок-схема алгоритма выделения \oplus -ядра минимальной мощности из N_+

(окончание)

Правила определения весов элементов обеспечивает радиопокрытие заданной территории и обслуживание всей нагрузки, представленной моделью трафика T_{mxn} .

2.3. Анализ разработанного алгоритма

Важнейшей характеристикой синтезированного алгоритма является вычислительная сложность, определяемая количеством необходимых вычислений. Оценим время, требующееся для синтеза оптимальной по критерию (2.1) сети связи в соответствии с разработанным алгоритмом и сравним его с аналогичным временем при использовании метода прямого перебора. Для этого введем обозначения:

t_{Scov} – время расчета площади покрытия конфигурации сектора БС, с;

t_{Sserv} – время расчета площади обслуживания конфигурации сектора БС, с;

t_{Suniq} – время расчета уникальной площади обслуживания конфигурации сектора БС, с;

$t_{Traf real}$ – время расчета реальной нагрузки на конфигурацию сектора БС, с;

$t_{UservedArea}$ – время расчета изменения в площади покрытия сети, с;

t_{ϕ} – время расчета ЧТП сети, с;

n – потенциальное число мест установки БС;

m – число БС, вошедших в определенное множество N_+ (после завершения этапа I);

q – число БС, которые могут быть исключены из N_+ по одной (этап II);

p – число БС, вошедших в оптимальную сеть радиодоступа N^{opt} .

Примем допущение, что в «кольцо» на очередном шаге первого этапа входит одна наименее удачно расположенная БС (вес которой максимален) и 3 конфигурации соседних БС с появившимся после удаления необслуженным трафиком (веса которых меньше нуля).

Оценим время счета $T_{\text{этап I}}$ по разработанному алгоритму на первом этапе синтеза. Пусть $n=10$, $m=7$.

Для каждой из трех конфигураций каждого из трех секторов десяти БС определяется территория обслуживания и рассчитывается площадь S_{cov} этой

территории. Процедура производится один раз и вне зависимости от рассматриваемого алгоритма, поэтому далее не будем ее учитывать.

Для совокупности комбинаций секторов с наименьшей емкостью рассматриваемых 10 БС определим площади обслуживания S_{serv} , площади уникально обслуживания S_{uniq} и общую площадь покрытия сети $ServedArea$. На это потребуется $10 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + t_{ServedArea}$ секунд.

Общая площадь покрытия сети есть сумма площадей обслуживания образующих ее секторов, которые уже рассчитаны. Временем на суммирование можно пренебречь. Таким образом, можно считать, что потребуется $10 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})$ секунд.

После исключения наименее удачно стоящей БС в рассматриваемом множестве остается девять БС. Для каждого сектора этих БС необходимо оценить нагрузку. Для этого необходимо опять определить площади обслуживания S_{serv} и оценить изменение в площади покрытия сети. На это потребуется $9 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{UserverdArea}$ секунд. За малостью величины $t_{UserverdArea}$ ею можно пренебречь. Т.е. потребуется $9 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})$ секунд.

После удаления 3 перегруженных конфигураций производится процедура оценки частотно-территориально плана - t_{ϕ} секунд.

Таким образом, на удаление первой из десяти рассматриваемых БС потребуется $(10 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (9 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\phi}$ секунд. Для удаления второй БС потребуется $(9 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (8 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\phi}$ секунд, для третьей - $(8 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (7 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\phi}$ секунд.

Так мы заведомо не знаем, что оставшиеся семь БС образуют определенное множество H_+ , мы пытаемся повторить процедуру еще раз. На что требуется $(7 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\phi}$ секунд. По какой-либо причине это оказывается невозможно (наступает ограничение по площади покрытия, емкости или частотному ресурсу), поэтому мы возвращаем последнюю удаленную станцию назад и считаем множество H_+ сформированным, т.е. $|H_+| = 7$. Базовую станцию, которую не удалось удалить на последнем шаге этапа I, будем называть *критической*. В рассмотренном примере общее время счета составило:

$$T_{\text{этап I}} = [(10 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (9 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\Phi}] + [(9 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (8 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\Phi}] + \dots + [(7 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\Phi}],$$

или в общем виде:

$$T_{\text{этап I}} = \sum_{k=n}^m k \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + (k-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}. \quad (2.12)$$

Теперь оценим время $T_{\text{этап II}}$, необходимое для расчетов *на втором этапе* разработанного алгоритма. Будем считать, что из определимого множества N_+ , полученного на первом этапе, удастся исключить по одной какие-либо три БС при условии обеспечения оставшимися БС радиопокрытия заданной территории и обслуживания нагрузки с заданным уровнем качества. Таким образом, будем считать, что $m=7$, $q=3$.

Так как осуществленная на последнем шаге этапа I попытка удалить критическую базовую станцию, входящую во множество N_+ , не удалась, повторно пытаться удалить эту БС на этапе II не будем. Поэтому нам будет необходимо рассмотреть возможности удаления шести из семи входящих в N_+ базовых станций по одной. Этот процесс полностью совпадает с описанным на этапе I, с той лишь разницей, что очередная критическая БС остается в рассматриваемом множестве.

Согласно рассматриваемому примеру, из семи БС «лишними» оказываются три БС. Это значит, что в процессе выполнения этапа II каждая из трех «критических» БС возвращаются обратно, т.е. формула выглядит так:

$$T_{\text{этап II}} = [6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + [6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + [6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + [6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + [(6 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (5 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\Phi}] + [(5 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Suniq})) + (4 \cdot 3 \cdot (t_{Sserv} + t_{Traf real})) + t_{\Phi}],$$

или в общем виде:

$$T_{\text{этап II}} = p[(m-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + \sum_{k=m-1}^{p+1} [k \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + (k-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] \quad (2.13)$$

Таким образом, общее время синтеза оптимальной по критерию (2.1) сети связи по разработанному алгоритму составит:

$$\begin{aligned}
T_{\text{АЛГ}} = & \sum_{k=n}^m k \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + (k-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi} + \\
& + p[(m-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + \sum_{k=m-1}^{p+1} [k \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + (k-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}].
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

В формуле мы пренебрегаем временем, необходимым для вычисления всех весов и показателей, кроме Φ .

Видно, что разработанный алгоритм имеет полиномиальную сложность. Теперь оценим время расчета решаемой задачи при использовании метода прямого перебора исходного множества W_k аналогично тому, как это сделано в [1].

Имея суммарную нагрузку в сети в час наибольшего занятия, можно сделать вывод, что на обслуживание абонентов с заданным уровнем качества потребуется около p базовых станций (при применении разработанного алгоритма также заранее известно, что потребуется всего около p базовых станций, но места их установки выбираются последовательным исключением из исходного множества наиболее неудачных). Таким образом, задача синтеза оптимальной в смысле критерия (2.1) сети связи по методу прямого перебора состоит в последовательном просмотре вариантов установки p базовых станций в n потенциальных местах их установки, выборе подходящей конфигурации для секторов каждой БС и оценке частотного плана.

Исходя из того, что одна базовая станция состоит строго из трех секторов, каждый из которых может иметь одну из трех конфигураций, при этом из n станций должно остаться только p , причем не должны быть нарушены ограничения по покрытию, емкости и частотным назначениям, то формулу для оценки вычислительной сложности алгоритма прямого перебора можно записать так:

$$T_{\text{ПП}} = p \times C_n^p \times C_3^3 [t_{Sserv} + t_{Traf real} + t_{\Phi}].
\tag{2.15}$$

Очевидно, что вычислительная сложность метода прямого перебора является экспоненциальной.

Выигрыш по времени, который достигается при использовании разработанного алгоритма синтеза оптимальной по критерию (2.1) сети по сравнению с методом прямого перебора, можно определить формулой:

$$\Delta = \frac{T_{ПП}}{T_{АЛГ}}, \quad (2.16)$$

где $T_{ПП}$ и $T_{АЛГ}$ вычисляются по формулам (2.11) и (2.10) соответственно.

Если в рамках рассмотренного примера с десятью БС предположить, что $t_{Sserv} = t_{Suniq} = t_{Trafreal} = 0,5$ секунды, а $t_{\phi} = 15$ минут, то время счета по разработанному алгоритму составит 9324 секунды, т.е. около двух с половиной часов, а по алгоритму прямого перебора – 63574560 секунд, т.е. более двух лет. Таким образом, разработанный алгоритм эффективнее алгоритма прямого перебора более чем в 6800 раз!

В завершение необходимо отметить, что поскольку в процессе синтеза оптимальной сети алгоритм манипулирует расчетными данными покрытия секторов, то соответствие получаемых результатов реальной действительности напрямую зависит от «реалистичности» моделей, используемых для расчета. Особенности работы с моделями распространения радиосигнала приведены в Приложении 1.

Выводы к главе 2

1. Критерий, позволяющий синтезировать сеть оптимальной топологии, формализован в виде:

$$W^{opt} = \arg \min_{W \subseteq W_K} |W| \Big|_{F, S, Q, T_{mxn}},$$

где

W – подмножество конфигураций секторов БС, образующих сеть радиодоступа;

W^{opt} – множество конфигураций секторов БС, образующих оптимальную сеть радиодоступа;

W_K – исходное подмножество конфигураций секторов БС;

T_{mxn} – известная модель нагрузки в ЧНН;

F_0, S_0, Q_0 – частотный ресурс, территория радиопокрытия и качество услуг.

2. Оптимальная сеть радиодоступа обладает свойствами:
 - входящие в искомое подмножество W^{opt} элементы связаны друг с другом в максимальной степени;
 - собой они образуют сеть радиодоступа, т.е. в систему, выполняющую функцию обеспечения радиопокрытия заданной территории с заданным уровнем качества;
 - удаление любого элемента из искомого подмножества приводит к разрушению внутренней организации всех его остальных элементов как системы.
3. На основе теории монотонных систем разработан алгоритм синтеза оптимальной по сформулированному критерию сети радиодоступа, состоящий из двух этапов: этапа нахождения определимого множества H_+ и этапа выделения \oplus -ядра минимальной мощности из определимого множества H_+ .
4. Полученный алгоритм позволяет эффективно синтезировать оптимальную в смысле минимально возможного числа БС сеть радиодоступа в конфигурации, соответствующей модели нагрузки и имеющемуся частотному ресурсу.
5. Разработанный алгоритм позволяет минимизировать аспект субъективности.
6. Разработанный алгоритм обладает полиномиальной сложностью.
7. Соответствие характеристик реальной сети и сети, синтезированной на основе предлагаемого алгоритма, зависит от корректного выбора используемых моделей и тщательности их настройки.

ГЛАВА 3

3.1. Исходные данные

В качестве иллюстрации практического применения алгоритма, разработанного в рамках настоящей работы, рассмотрим задачу синтеза оптимальной по критерию (2.1) одноуровневой однодиапазонной сети связи стандарта GSM на примере города Костромы (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Город Кострома

3.1.1. Территория обслуживания и качество предоставления услуг

Предположим, что необходимо обеспечить сплошное радиопокрытие территории, приведенной на рис. 3.2.

Зададимся следующими качественными показателями для искомой сети связи на рассматриваемой территории:

- уровень сигнала по линии «вниз» в любой точке не ниже -100 дБм (соответствует усредненному значению уровня чувствительности приемников абонентских терминалов);
- допустимый уровень блокировок на разговорных каналах не более 2%.



Рис. 3.2. Целевая территория

3.1.2. Частотный ресурс

Для простоты рассмотрения будем считать, что из-за частотных ограничений конфигурация сектора не может превышать двух приемо-передатчиков. Это позволит отказаться от постоянного расчета ЧТП в процессе синтеза сети.

3.1.3. Множество базовых станций

Теперь необходимо установить возможные места размещения базовых станций на рассматриваемой территории. Чем детальнее будет проделана эта

работа, тем качественнее будет результат оптимизации, поскольку синтез оптимальной сети происходит в рамках определенного на данном этапе множества БС.

Поиск мест размещения БС производится с использованием специализированных гео-информационных систем с детальной картографической информацией. На выходе получаем некоторое множество $W_{БС}$ в виде пар $\{ \langle x_0, y_0 \rangle_i, h_i \}$, определяющих географические координаты и высоту размещения антенн для каждого потенциального места установки базовой станции. Эта информация заносится в электронную базу данных для хранения и дальнейшей обработки.

В рассматриваемом примере выявлено 30 потенциальных мест установки базовых станций. Их размещение показано на рис. 3.3.

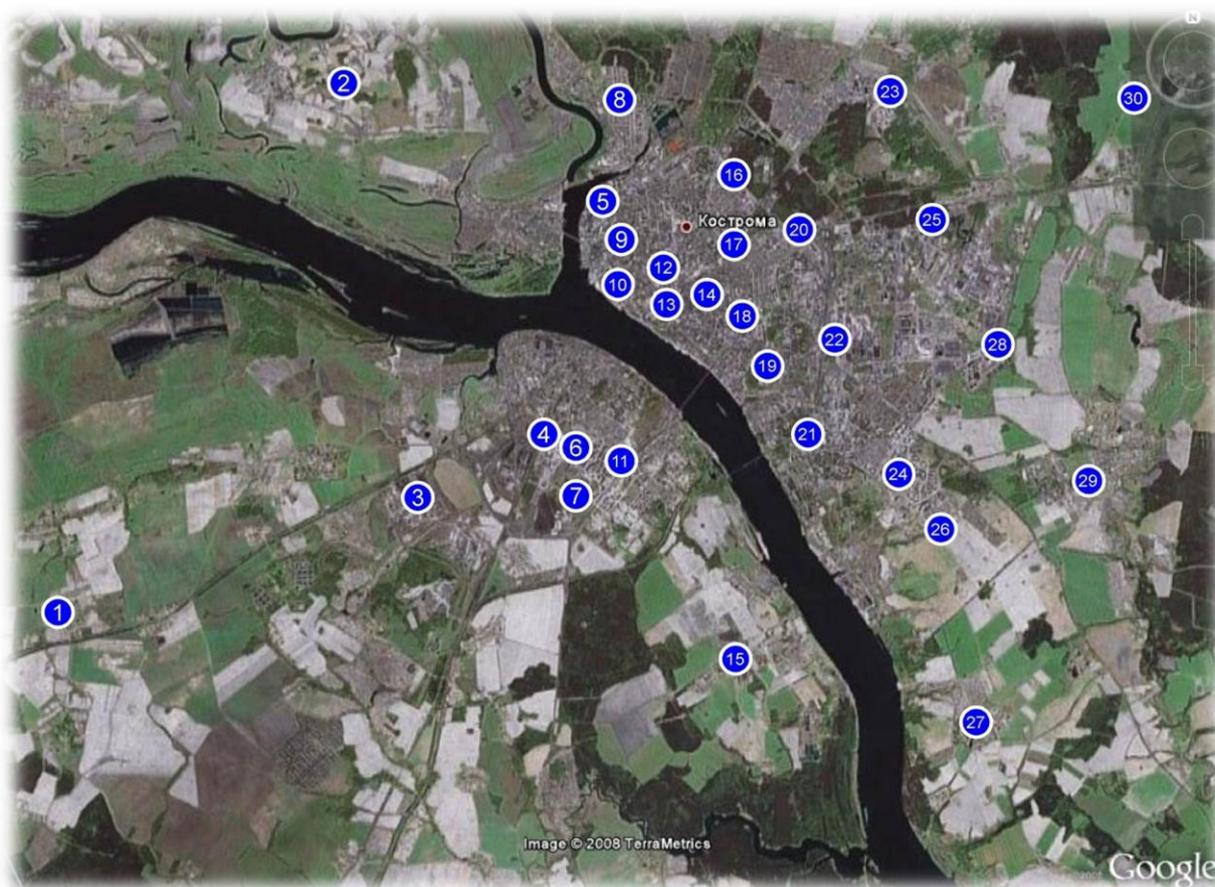


Рис. 3.3. Потенциальные места установки БС

3.1.4. Секторизация БС и существенные характеристики

Согласно изложенному в п.2.1.2.2 все БС являются трехсекторными, с азимутами 0° , 120° и 240° для первого, второго и третьего секторов, соответственно. Антенны используем везде одинаковые.

Существенные с точки зрения формирования зон радиопокрытия технические характеристики определим унифицированным образом:

- угол механического наклона антенны $\beta_m = 2^\circ$;
- угол электрического наклона антенны $\beta_e = 2^\circ$;
- реальная мощность на выходе передатчика $P_{TRX} = 46$ дБм;
- потери в фидере $L_f = 4$ дБ/100 м;
- потери в комбайнере

$$L_c = \begin{cases} 1.2 \text{ дБм при } N_{TRX} = 1, 2 - \text{конфигурация 1;} \\ 3 \text{ дБм при } N_{TRX} = 3, 4 - \text{конфигурация 2;} \\ 6 \text{ дБм при } N_{TRX} = 5, 6, 7, 8 - \text{конфигурация 3.} \end{cases}$$

- максимально допустимое количество передатчиков $N_{TRX} = 2$.

На основании этих данных из множества W_{BC} формируется множество W_K , состоящее из набора различных конфигураций каждого сектора всех базовых станций из множества W_{BC} , описываемое в виде (2.2). Эта информация также заносится в электронную базу данных.

3.1.5. Зоны покрытия

После того, как все элементы исходной сети описаны, необходимо рассчитать зоны их покрытия. Для этого информацию о конфигурации секторов необходимо загрузить в специализированную программу, которая содержит цифровую карту рассматриваемой территории и откалиброванную специальным образом модель распространения сигнала. Такого рода программы широко используются в компаниях-операторах сетей связи.

После необходимых расчетов на выходе программы получаем текстовый файл, содержащий уровни сигнала от каждого элемента сети в каждой точке рассматриваемой территории.

3.1.6. Трафик

Модель трафика T_{max} также может быть определена с помощью ГИС, снабженной соответствующим слоем/модулем. В качестве примера используем модель с равномерным распределением нагрузки по территории со значениям 0.05 Эрланга на единицу площади, в данном случае – на квадратный километр. Также как и с зонами покрытия, трафик представляется в виде текстового файла с указанием координат точек рассматриваемой территории с соответствующей им нагрузкой. Этап подготовки данных завершен.

3.2. Синтез оптимальной сети

В соответствии с предлагаемым алгоритмом и на основе подготовленных данных синтезируем оптимальную сеть стандарта GSM для г.Костромы. Синтез производится в два этапа.

3.2.1. Этап I

На этапе I выделим из множества W_K определимое множество H_+ . Для этого по каждому элементу множества W_K определим площади S_{cov} , S_{serv} , S_{uniq} , обслуживаемый трафик $Traf_{real}$ и площадь обслуживания исходной сети.

Площадь обслуживания исходной сети составляет 1905 км². Зоны обслуживания сайтов исходной сети показаны на рис. 3.4.

Исходя из рассчитанных данных вычисляются начальные веса π , ρ и λ . В табл. 3.1 приведены исходные данные и вычисленные по ним веса для первых четырех БС. Вес Φ не рассматривается по причине введенного выше ограничения на количество приемопередатчиков.

Наибольший вес λ на этом этапе имеет БС 1012. Она является «наихудшей» и исключается из исходного множества W_K . После удаления БС 1012 элементы с весом $\rho = -1$ не появляются.

Таким образом, сформировано первое «кольцо». Далее алгоритм повторяется, «наихудшая» БС – БС 1014 и т.д.

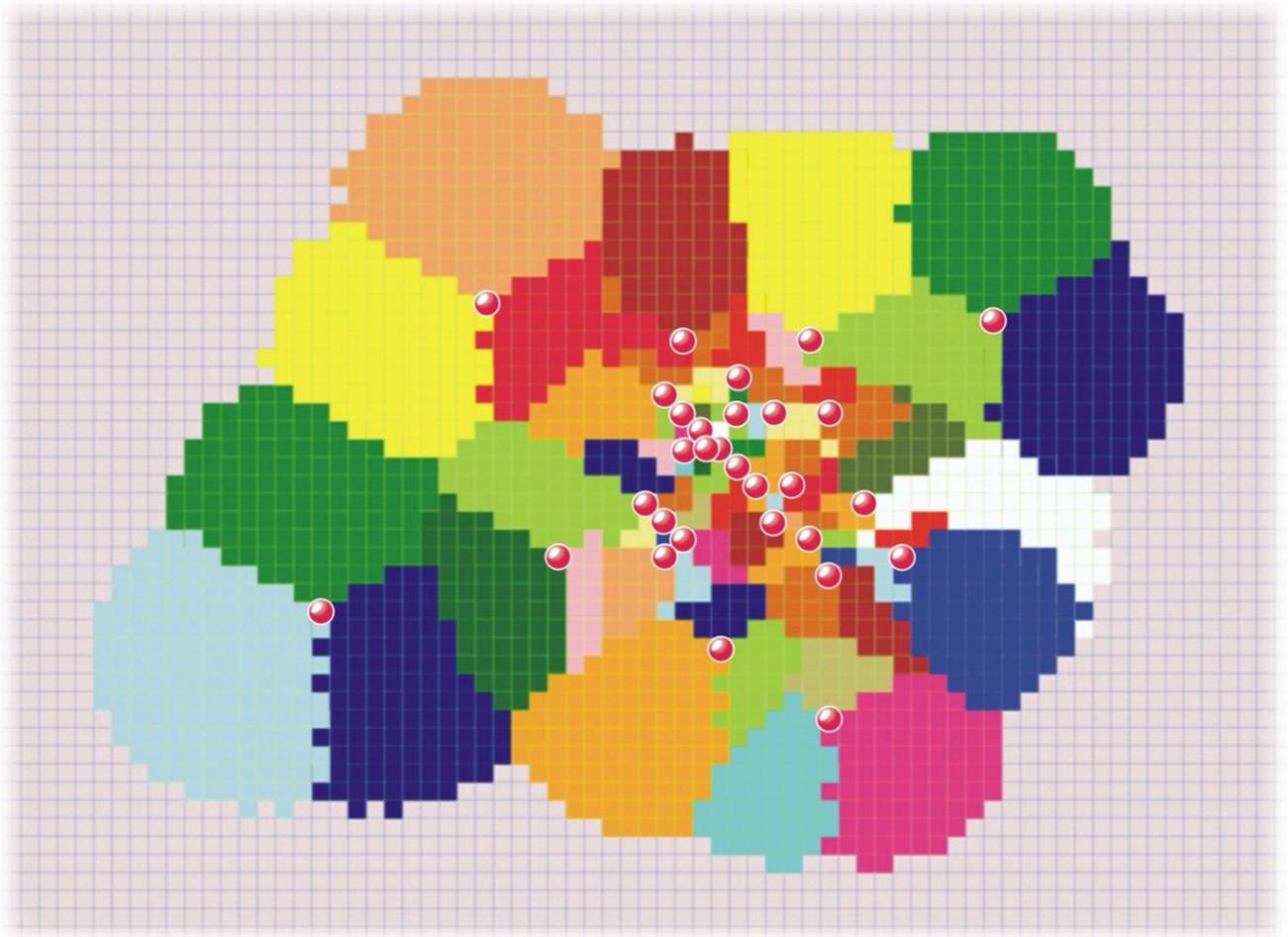


Рис. 3.4. Зона покрытия исходной сети

Таблица 3.1

Site	Sector	PCombination	Height	Azimuth	TrxRange	CovArea	ServArea	UniqCovArea	TrafficReal	TrafficMax	ρ	π	λ
1001	1	1	72	0	1	225	124	10	6,2	9	0	0	0
1001	1	2	72	0	2	184	0	0	0	24,6	0	1	
1001	1	3	72	0	3	127	0	0	0	59,1	0	1	
1001	2	4	72	120	1	221	114	15	5,7	9	0	0	
1001	2	5	72	120	2	176	0	0	0	24,6	0	1	
1001	2	6	72	120	3	131	0	0	0	59,1	0	1	
1001	3	7	72	240	1	221	158	29	7,9	9	0	0	
1001	3	8	72	240	2	176	0	0	0	24,6	0	1	
1001	3	9	72	240	3	131	0	0	0	59,1	0	1	

Таблица 3.1 (окончание)

Site	Sector	PCombination	Height	Azimuth	TrxRange	CovArea	ServArea	UniqCovArea	TrafficReal	TrafficMax	ρ	π	λ
1002	4	10	52	0	1	206	138	22	6,9	9	0	0	0
1002	4	11	52	0	2	167	0	0	0	24,6	0	1	
1002	4	12	52	0	3	118	0	0	0	59,1	0	1	
1002	5	13	52	120	1	199	47	0	2,35	9	0	0,76	
1002	5	14	52	120	2	165	0	0	0	24,6	0	1	
1002	5	15	52	120	3	116	0	0	0	59,1	0	1	
1002	6	16	52	240	1	199	115	7	5,75	9	0	0	
1002	6	17	52	240	2	165	0	0	0	24,6	0	1	
1002	6	18	52	240	3	116	0	0	0	59,1	0	1	
1003	7	19	42	0	1	186	41	0	2,05	9	0	0,78	8,29
1003	7	20	42	0	2	152	0	0	0	24,6	0	1	
1003	7	21	42	0	3	106	0	0	0	59,1	0	1	
1003	8	22	42	120	1	184	24	0	1,2	9	0	0,87	
1003	8	23	42	120	2	151	0	0	0	24,6	0	1	
1003	8	24	42	120	3	109	0	0	0	59,1	0	1	
1003	9	25	42	240	1	184	66	0	3,3	9	0	0,64	
1003	9	26	42	240	2	151	0	0	0	24,6	0	1	
1003	9	27	42	240	3	109	0	0	0	59,1	0	1	
1004	10	28	72	0	1	225	10	0	0,5	9	0	0,96	8,91
1004	10	29	72	0	2	184	0	0	0	24,6	0	1	
1004	10	30	72	0	3	127	0	0	0	59,1	0	1	
1004	11	31	72	120	1	221	1	0	0,05	9	0	1	
1004	11	32	72	120	2	176	0	0	0	24,6	0	1	
1004	11	33	72	120	3	131	0	0	0	59,1	0	1	
1004	12	34	72	240	1	221	10	0	0,5	9	0	0,95	
1004	12	35	72	240	2	176	0	0	0	24,6	0	1	
1004	12	36	72	240	3	131	0	0	0	59,1	0	1	

На 15-м шаге итерационного процесса после удаления БС 1005 из-за появления необслуженной территории в очередное «кольцо» попадают 10 оставшихся БС и множество исчерпывается. Определенное множество H_+ сформировано, этап I завершен (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Site	λ	ρ_{site}
	<i>ServedAreaTot = 1905</i>	
1001	0	0
1002	0	0
1003	8,15	0
1005	8,56	0
1008	0	0
1015	0	0
1023	0	0
1027	0	0
1028	0	0
1029	0	0
1030	0	0

Площадь покрытия сети в текущей конфигурации - 1905 км² (рис. 3.5).

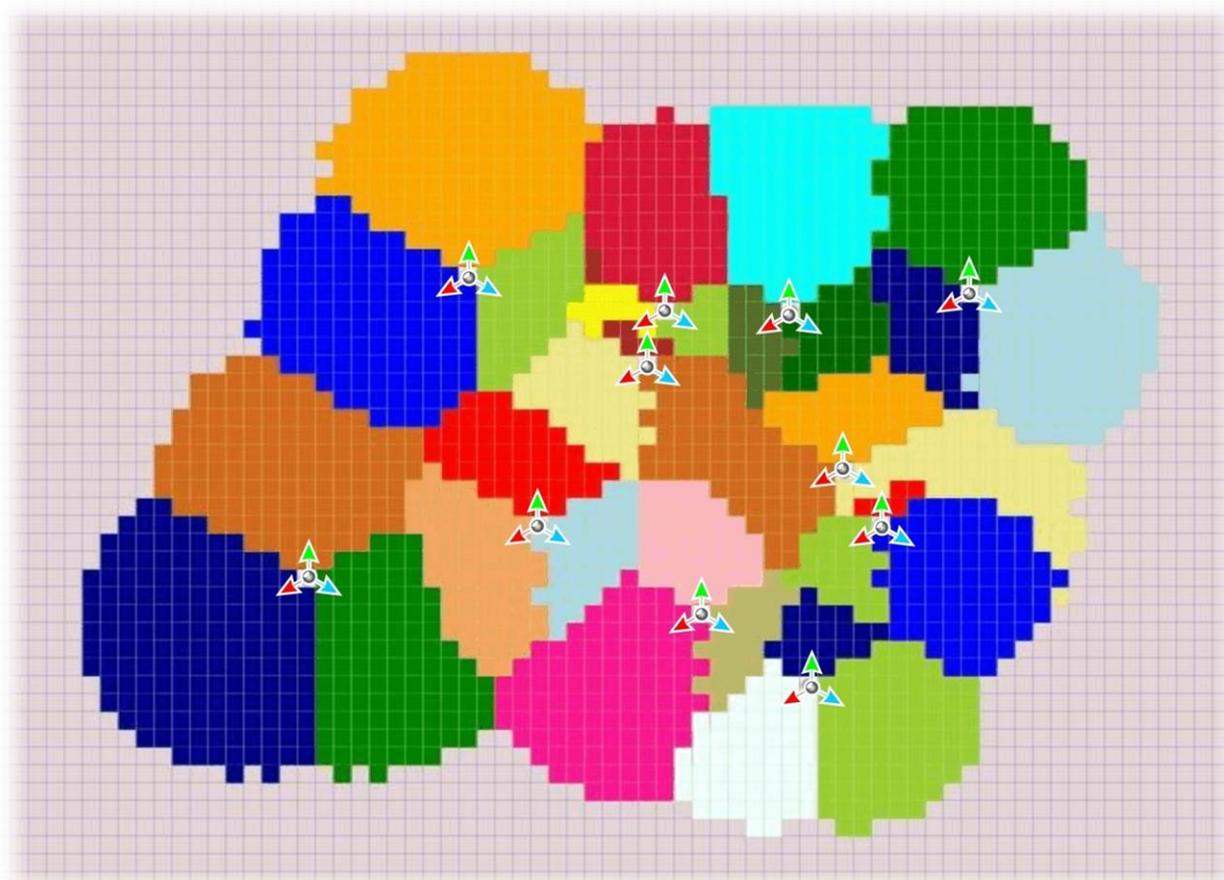


Рис. 3.5. Покрытие сети в конце этапа I

Площадь обслуживания сети после исключения 19-ти БС осталась неизменной, необслуженный трафик не появился. Изменение весов БС в процессе поиска определимого множества графически показано на рис. 3.6.

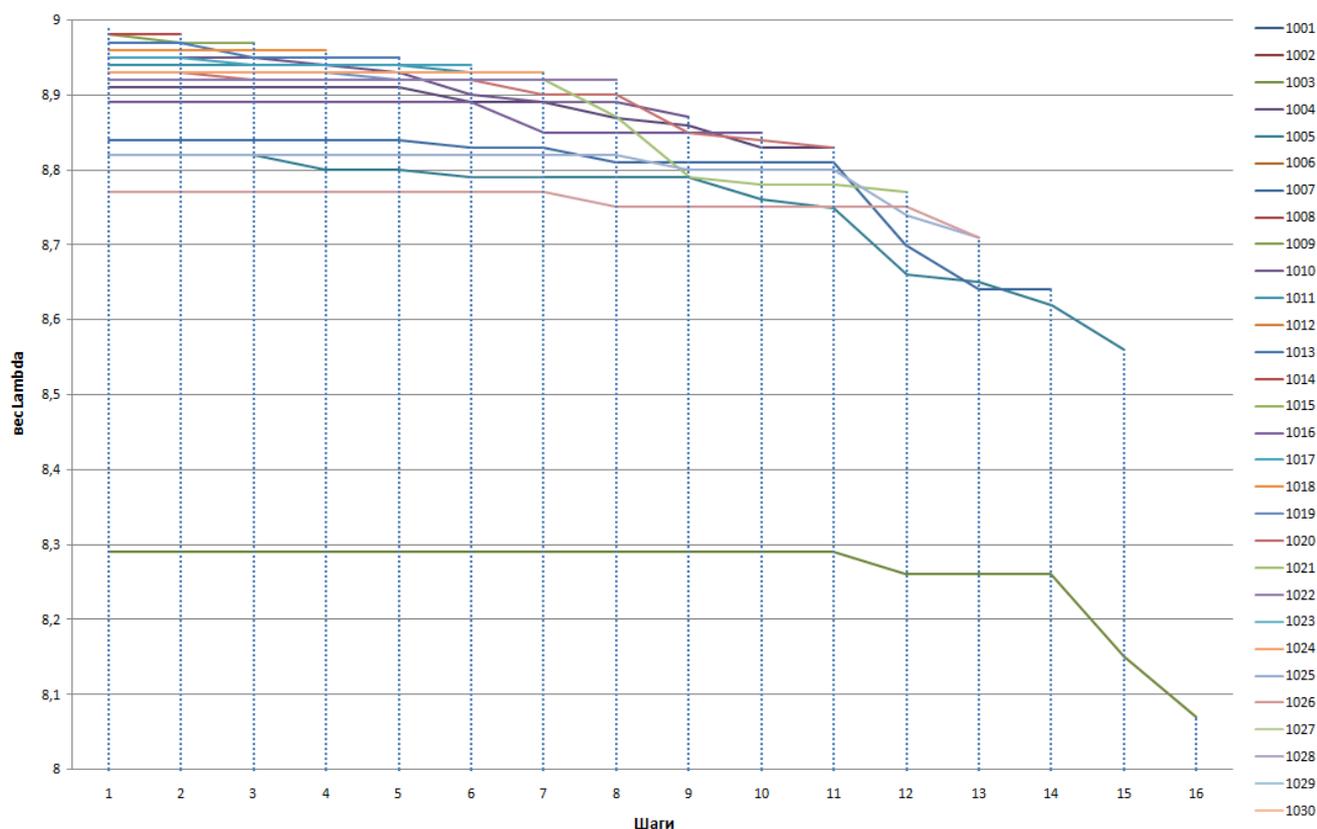


Рис. 3.6. Изменение весов БС в процессе построения определимого множества

3.2.2. Этап II

В рамках H_+ существует две БС с весом $\lambda > 0$ (табл. 3.2). Удаление БС 1005 невозможно, т.к. это приводит к исчерпанию всего множества (см. этап построения H_+), остается БС 1003. Ее удаление не приводит к появлению необслуженного трафика и территории. Значения весов λ оставшихся БС показано в табл. 3.3.

Все оставшиеся БС имеют $\lambda = 0$, а значит – уникальные зоны обслуживания, т.е. ни одну из них удалить без появления необслуженной территории нельзя.

Таким образом, оставшиеся 10 БС – искомое ядро H_+ минимальной мощности – оптимальная сеть для Костромы при заданных начальных условиях (рис. 3.7).

Таблица 3.3

Site	λ	ρ_{site}
	<i>ServedAreaTot = 1905</i>	
1001	0	0
1002	0	0
1005	0	0
1008	0	0
1015	0	0
1023	0	0
1027	0	0
1028	0	0
1029	0	0
1030	0	0

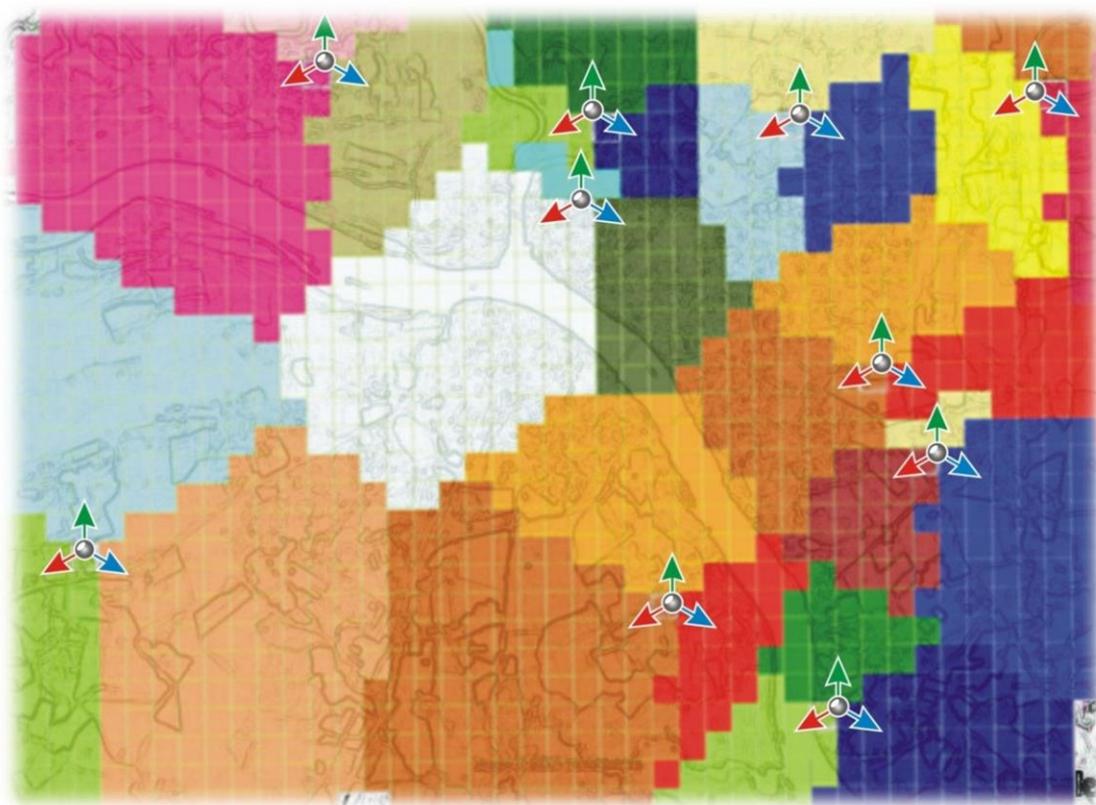


Рис. 3.7. Синтезированная для Костромы оптимальная сеть стандарта GSM

Изменения весов для БС, вошедших в оптимальное множество, приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во				
		<i>ServedAreaATot = 2364</i>					<i>ServedAreaATot = 2364</i>					<i>ServedAreaATot = 2364</i>				
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ
1001	1	10	6,2	0	0	0	10	6,2	0	0	0	10	6,6	0	0	0
1001	2	15	5,7	0	0		15	5,7	0	0		18	7,65	0	0	
1001	3	29	7,9	0	0		29	7,9	0	0		29	7,9	0	0	
1002	4	22	6,9	0	0	0	22	6,9	0	0	0	22	6,9	0	0	0
1002	5	0	2,35	0	0,76		0	2,35	0	0,76		0	2,5	0	0,75	
1002	6	7	5,75	0	0		7	5,75	0	0		7	6	0	0	
1005	13	0	0,55	0	0,95	8,82	0	0,55	0	0,95	8,56	0	0,55	0	0,95	0
1005	14	0	0,1	0	0,99		0	1,95	0	0,82		0	1,95	0	0,82	
1005	15	0	1,3	0	0,88		0	2,25	0	0,79		6	5	0	0	
1008	22	6	3,55	0	0	0	6	3,6	0	0	0	6	3,6	0	0	0
1008	23	0	0,25	0	0,97		0	0,65	0	0,92		0	0,65	0	0,92	
1008	24	0	0,55	0	0,93		0	0,6	0	0,92		0	0,6	0	0,92	
1015	43	0	0,55	0	0,95	0	0	2	0	0,81	0	0	2,65	0	0,74	0
1015	44	0	1,3	0	0,87		0	1,45	0	0,85		0	1,45	0	0,85	
1015	45	13	5,25	0	0		13	5,35	0	0		14	6,7	0	0	
1023	67	11	4,7	0	0	0	11	4,7	0	0	0	11	4,7	0	0	0
1023	68	0	1	0	0,89		0	1,45	0	0,84		0	1,45	0	0,84	
1023	69	0	0,45	0	0,95		0	1,1	0	0,88		0	1,1	0	0,88	
1027	79	0	0,85	0	0,86	0	0	1,1	0	0,82	0	0	1,1	0	0,82	0
1027	80	11	4,25	0	0		11	4,25	0	0		11	4,25	0	0	
1027	81	5	2,8	0	0		5	2,8	0	0		5	2,8	0	0	
1028	82	0	1,15	0	0,9	0	0	1,95	0	0,84	0	0	1,95	0	0,84	0
1028	83	9	3,5	0	0		9	3,5	0	0		9	3,5	0	0	
1028	84	0	0,25	0	0,98		0	2	0	0,83		0	2	0	0,83	
1029	85	0	0,3	0	0,96	0	0	0,3	0	0,96	0	0	0,3	0	0,96	0
1029	86	1	3,8	0	0		1	3,95	0	0		1	3,95	0	0	
1029	87	0	0,35	0	0,95		0	1,25	0	0,83		0	1,25	0	0,83	

Таблица 3.4 (окончание)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во					
		<i>ServedAreaATot = 2364</i>					<i>ServedAreaATot = 2364</i>					<i>ServedAreaATot = 2364</i>					
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	
1030	88	12	4,7	0	0	0	12	4,7	0	0	0	12	4,7	0	0		
1030	89	14	5,15	0	0		14	5,15	0	0		0	14	5,15	0	0	0
1030	90	0	1,8	0	0,76		0	1,8	0	0,76		0	0	1,8	0	0,76	0

Время счета данного примера на ЭВМ с процессором Intel Core 2 Duo 2.00 GHz и объемом оперативной памяти 2 Гб в разработанном программном комплексе составило 35 минут.

3.3. Применение алгоритма

Далее описано применение разработанного алгоритма при решении различных практических задач.

3.3.1. Построение одноуровневой сети

В этом разделе показано, как предлагаемый алгоритм использовался для оценки объемов строительства при развертывании компанией-оператором сети GSM в г.Заречный Пензенской области. Задача состояла в определении оптимальной конфигурации сети – количестве и месте расположения БС и их емкости. Исходное множество площадок-кандидатов было определено в 42 позиции. Исходная «избыточная» сеть показана на рис. 3.8.

Она обеспечивает покрытие с заданным уровнем на площади 23,64 кв. км.

В соответствии с описанной ранее процедурой на первом этапе за 34 шага было определено ядро, включающее 18 БС (рис. 3.9). Изменение весов БС показано на рис. 3.10.

Далее за 7 шагов из ядра было выделено искомое оптимальное множество в 17 БС. Географическое размещение БС оптимального множества и зоны их обслуживания показаны на рис. 3.11, 3.12. Изменения весов для БС, вошедших в оптимальное множество, приведены в таблице 3.5.



Рис. 3.8. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС



Рис. 3.9. Ядро, включающее 18 БС

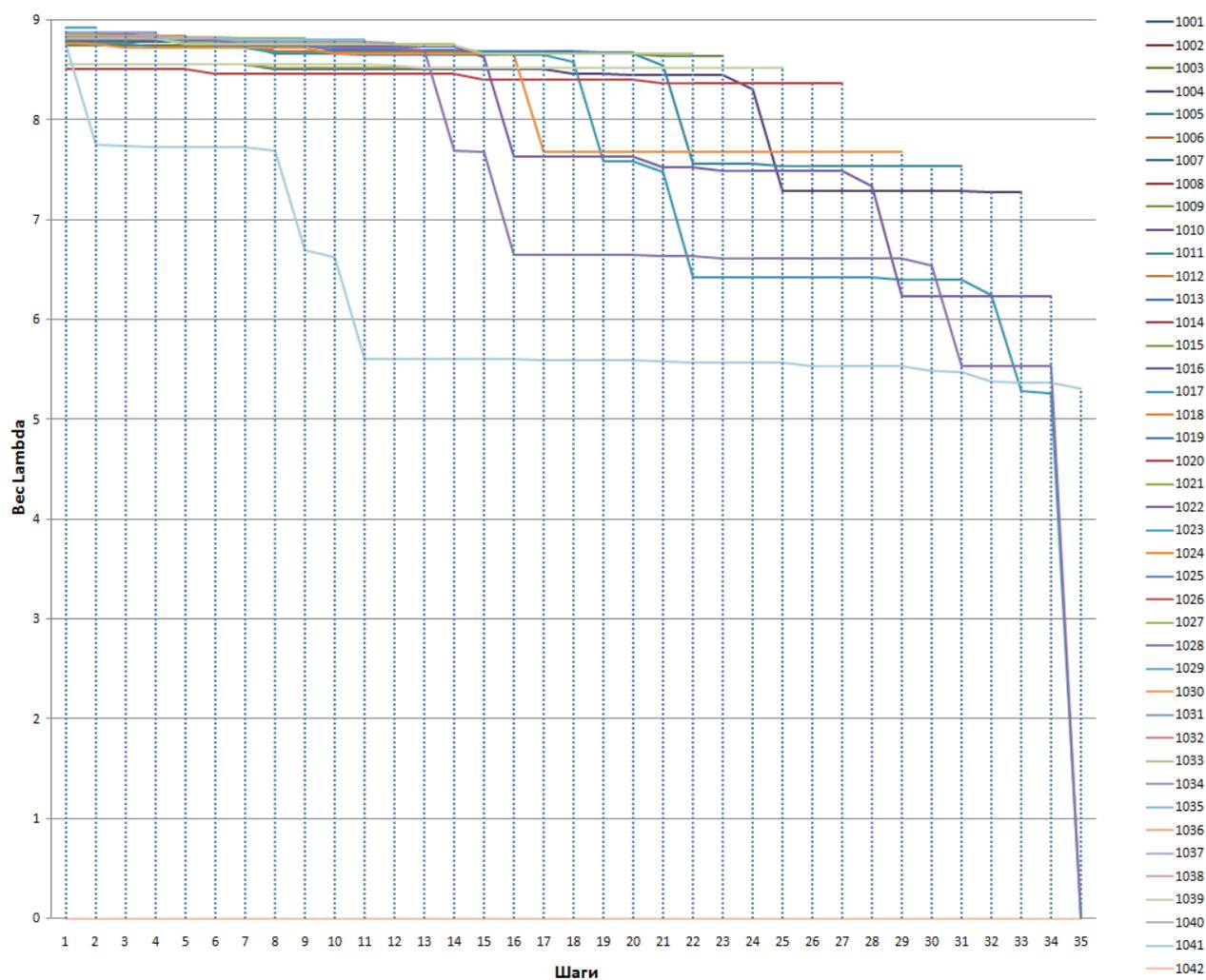


Рис. 3.10. Изменение весов БС в процессе построения определимого множества



Рис. 3.11. Оптимальное множество, включающее 17 БС

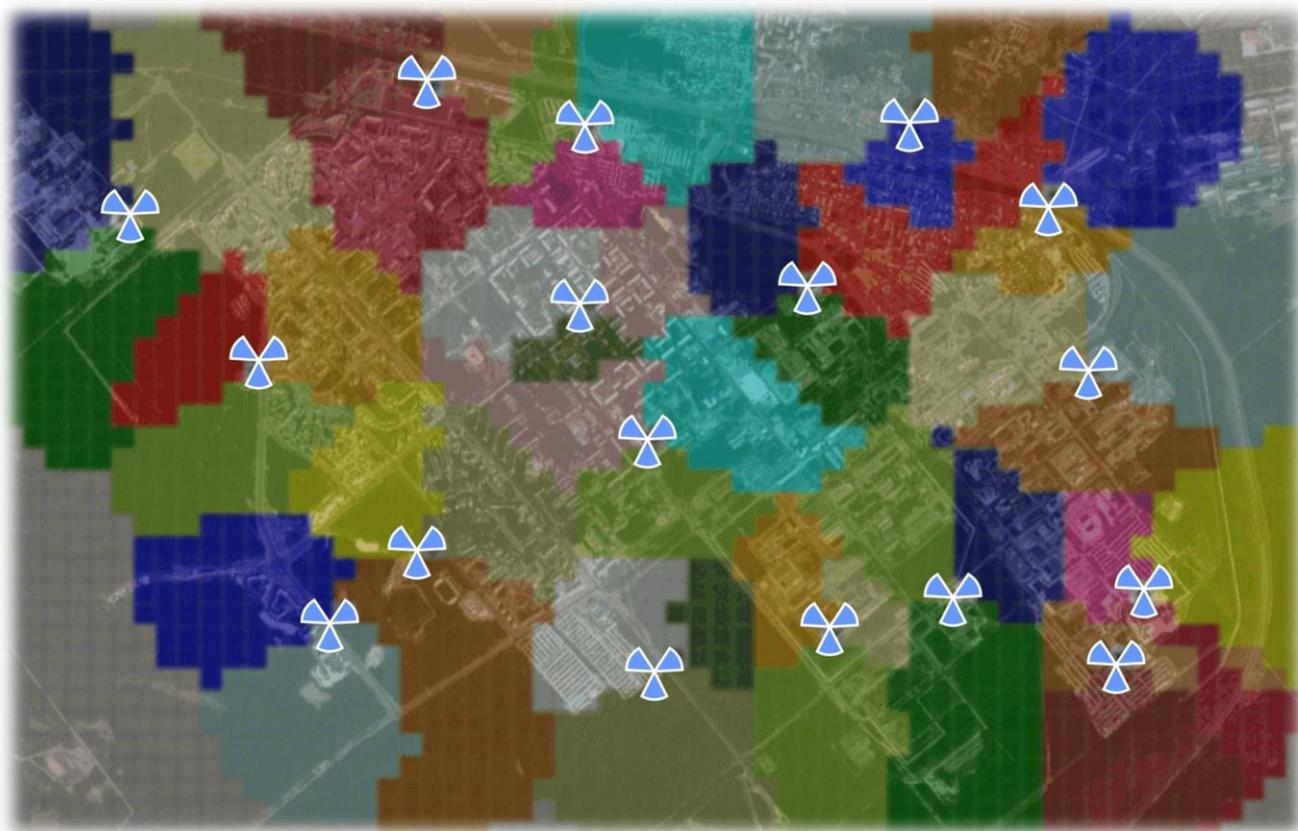


Рис. 3.12. Покрытие итоговой сети из 17 БС

Таблица 3.5

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во						
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>						
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ		
1001	1	10	0,72	0	0	0	10	1,12	0	0	0	10	1,12	0	0	0		
1001	2	1	0,47	0	0		2	8,62	0	0		0	2	8,62	0		0	0
1001	3	22	1,21	0	0		22	1,21	0	0		0	22	1,21	0		0	0
1002	4	2	4,71	0	0	0	2	8,71	0	0	0	2	8,71	0	0	0		
1002	5	0	4	0	0,92		0	19,6	0	0,55		0	0	19,6	0		0,55	0
1002	6	0	1,07	0	0,78		1	2,3	0	0		0	1	2,3	0		0	0
1005	13	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0		
1005	14	0	1,26	0	0,93		0	1,26	0	0,93		0	0	1,26	0		0,93	0
1005	15	6	5,24	0	0		6	5,24	0	0		0	6	5,24	0		0	0

Таблица 3.5 (продолжение)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во				
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>				
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ
1008	22	0	2,03	0	0,95	0	0	19,23	0	0,6	0	0	19,23	0	0,6	0
1008	23	7	0,71	0	0		7	1,11	0	0		7	1,11	0	0	
1008	24	10	0,83	0	0		11	3,77	0	0		11	3,77	0	0	
1009	25	9	1,86	0	0	0	9	2,84	0	0	0	9	2,84	0	0	0
1009	26	0	5,6	0	0,94		0	18,41	0	0,73		0	18,41	0	0,73	
1009	27	0	9,2	-1	0,9		0	17,2	0	0,76		0	17,2	0	0,76	
1016	46	0	4,4	0	0,91	0	0	8	0	0,81	0	0	8	0	0,81	0
1016	47	3	2,04	0	0		5	8,17	0	0		5	8,17	0	0	
1016	48	0	0,96	0	0,86		0	3,77	0	0,8		0	3,77	0	0,8	
1017	49	0	3,2	0	0,94	8,77	0	5,6	0	0,87	5,26	0	5,6	0	0,87	5,26
1017	50	0	5,2	0	0,9		0	10,4	0	0,76		0	10,4	0	0,76	
1017	51	0	3,6	0	0,93		0	16,4	0	0,63		0	16,4	0	0,63	
1022	64	0	2	0	0,96	8,83	0	7,6	0	0,85	6,23	0	13,2	0	0,69	5,03
1022	65	0	3,2	0	0,94		0	12	0	0,73		0	13,6	0	0,69	
1022	66	0	3,6	0	0,93		0	15,2	0	0,65		0	15,6	0	0,65	
1025	73	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0
1025	74	0	0,51	0	0,91		0	1,32	0	0,89		0	2,13	0	0,87	
1025	75	0	0,15	0	0,89		0	5,35	0	0,8		0	6,15	0	0,78	
1029	85	0	2,8	0	0,94	0	0	8	0	0,79	0	0	8	0	0,79	0
1029	86	7	1,39	0	0		8	1,39	0	0		8	1,39	0	0	
1029	87	4	1,29	0	0		5	4,62	0	0		5	4,62	0	0	
1032	94	11	0,83	0	0	0	11	0,84	0	0	0	11	0,85	0	0	0
1032	95	0	1,62	0	0,97		0	5,75	0	0,87		0	7,75	0	0,85	
1032	96	0	3,66	0	0,93		0	8,86	0	0,87		0	16,44	0	0,74	
1036	106	0	0,09	0	0,92	0	0	1,72	0	0,86	0	0	2,56	0	0,81	0
1036	107	6	0,69	0	0		6	0,69	0	0		6	0,69	0	0	
1036	108	0	3,3	0	0,85		0	5,71	0	0,79		0	5,71	0	0,79	

Таблица 3.5 (окончание)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во					
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	
1037	109	0	0,12	0	0,95	0	0	1,15	0	0,83	0	0	2,76	0	0,81	0	
1037	110	15	1,18	0	0		16	1,28	0	0		16	1,28	0	0		0
1037	111	0	0,14	0	0,94		0	7,02	0	0,82		0	12,95	0	0,73		
1038	112	6	0,68	0	0	0	6	0,68	0	0	0	6	0,68	0	0	0	
1038	113	0	0,21	0	0,83		0	0,21	0	0,83		0	0,21	0	0,83		
1038	114	0	0,1	0	0,92		0	0,12	0	0,9		0	0,12	0	0,9		
1040	118	3	0,31	0	0	0	3	0,31	0	0	0	3	0,31	0	0	0	
1040	119	10	0,72	0	0		12	0,95	0	0		12	0,95	0	0		
1040	120	0	0,1	0	0,94		0	0,2	0	0,88		0	0,2	0	0,88		
1041	121	0	10,8	-1	0,88	8,75	0	14	0	0,81	5,37	0	14	0	0,81	5,3	
1041	122	0	5,6	0	0,94		0	14,8	0	0,79		0	20	0	0,72		
1041	123	0	6	0	0,93		0	16	0	0,77		0	16	0	0,77		
1042	124	9	0,75	0	0	0	9	0,77	0	0	0	9	0,77	0	0	0	
1042	125	0	0,97	0	0,86		0	1,37	0	0,85		0	1,37	0	0,85		
1042	126	0	0,19	0	0,86		0	2,33	0	0,71		0	2,33	0	0,71		

Таким образом, для обслуживания с заданным уровнем качества исходной территории, достаточно 17 БС. Исходя из этих данных, был определен бюджет и сроки реализации проекта по развертыванию сети GSM на рассматриваемой территории.

Время счета задачи составило 90 минут.

3.3.2. Построение иерархической сети

На начальном этапе развития сети основной упор, как правило, делается на обеспечение в первую очередь покрытия рассматриваемой территории. Приоритет отдается площадкам, обеспечивающим достаточно высокий уровень размещения

антенн базовых станций. Под высоким уровнем в данном случае понимается высота «над уровнем крыш» зданий.

По мере роста абонентской базы возникает необходимость в увеличении емкости сети, что приводит к увеличению плотности размещения БС. А поскольку увеличение емкости возможно только за счет переиспользования частотного ресурса, антенны базовых станций начинают размещать ниже, опускаясь с уровня «над уровнем крыш» на уровень «ниже уровня крыш». В какой-то момент плотность размещения БС становится такова, что абоненты, находящиеся в движении, начинают испытывать ухудшение качества связи из-за постоянных хендверов при голосовых вызовах и перевыборов сот при передаче данных.

Разрешить эту проблему можно с помощью задействования специального функционала оборудования сети, который позволяет логически разделить соты на разные уровни (например, верхний – для высоких БС, нижний – для низких) и присвоить им соответствующие приоритеты для процедур хендверов и перевыборов сот в зависимости от степени подвижности абонента.

Таким образом, быстро движущийся абонент будет обслуживаться «высокими» БС и не будет часто осуществлять переход из соты в соту, тогда как неподвижный абонент будет обслуживаться «низкими» БС, что позволит разгрузить «высокие» БС и даст возможность более эффективно переиспользовать частотный ресурс на данной территории.

Ниже показано использование разработанного алгоритма для решения задачи построения иерархической сети. Задача была поставлена следующим образом: оценить конфигурацию сети при двухуровневой иерархии (для «быстрых» и «медленных» абонентов) для г.Заречный. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС (рис. 3.13) обеспечивает покрытие с заданным уровнем на площади 23,64 кв. км (рис. 3.14). Емкость БС «верхнего» уровня - минимальная.

Концепция применения алгоритма для построения двухуровневой сети была выбрана следующая: **на первом этапе** синтезировалась минимальная совокупность БС, обеспечивающая сплошное покрытие рассматриваемой

территории не менее исходного. При этом требования обеспечения емкости игнорировались - «лишняя» БС удалялась даже в том случае, если это приводило к появлению перегрузок у ее «соседей».

Задача была решена за 23 шага. Результаты показаны на рис. 3.15 и 3.16. Изменения весов для БС, вошедших в оптимальное множество, приведены в таблице 3.6.

Проблема обеспечения емкости решалась **на втором этапе**, когда необходимо было из исходных 42 БС выявить совокупность минимального объема, которая обеспечивала бы полную утилизацию трафика на рассматриваемой территории при рассмотрении совместно с БС «слоя покрытия».



Рис. 3.13. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС

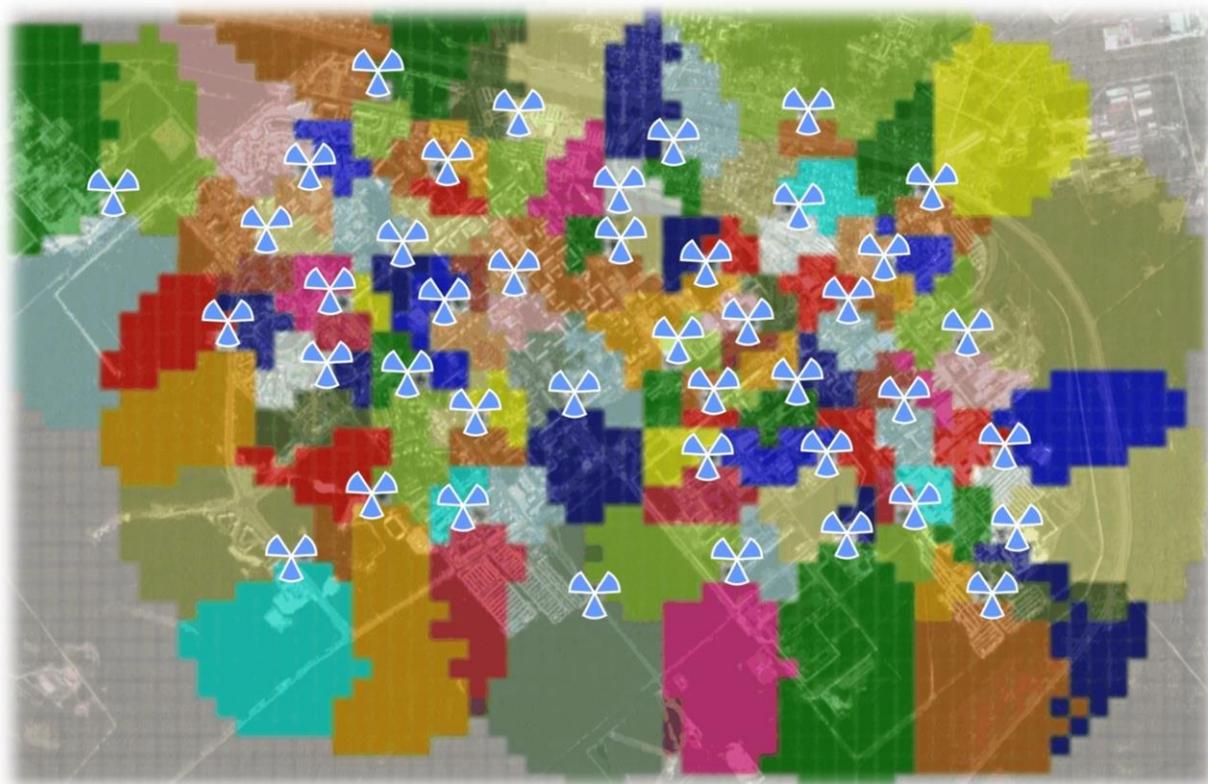


Рис. 3.14. Покрытие исходной сети из 42 БС



Рис. 3.15. Совокупность из 16 БС, обеспечивающая исходное покрытие



Рис. 3.16. Покрытие, обеспечиваемое совокупностью из 16 БС

Таблица 3.6

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во						
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>						
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ		
1001	1	10	0,72	0	0	0	10	1,12	0	0	0	10	1,12	0	0	0		
1001	2	1	0,47	0	0		2	7,42	0	0		2	7,42	0	0		0	
1001	3	22	1,21	0	0		22	1,21	0	0		22	1,21	0	0		0	
1002	4	2	4,71	0	0	0	2	7,91	0	0	0	2	7,91	0	0	0		
1002	5	0	4	0	0,92		0	22,8	-1	0,57		0	0	22,8	-1		0,57	0
1002	6	0	1,07	0	0,78		1	2,3	0	0		1	2,3	0	0		0	
1005	13	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0		
1005	14	0	1,26	0	0,93		0	1,26	0	0,93		0	0	1,26	0		0,93	0
1005	15	6	5,24	0	0		6	5,24	0	0		6	5,24	0	0		0	

Таблица 3.6 (окончание)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во				
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>				
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ
1008	22	0	2,03	0	0,95	0	0	23,63	-1	0,62	0	0	23,63	-1	0,62	0
1008	23	7	0,71	0	0		7	1,11	0	0		7	1,11	0	0	
1008	24	10	0,83	0	0		11	2,17	0	0		11	2,17	0	0	
1009	25	9	1,86	0	0	0	9	2,42	0	0	0	9	2,42	0	0	0
1009	26	0	5,6	0	0,94		0	19,63	-1	0,76		0	19,63	-1	0,76	
1009	27	0	9,2	-1	0,9		0	13,2	0	0,81		0	13,2	0	0,81	
1016	46	0	4,4	0	0,91	0	0	16,8	-1	0,67	0	0	16,8	-1	0,67	0
1016	47	3	2,04	0	0		5	6,57	0	0		5	6,57	0	0	
1016	48	0	0,96	0	0,86		0	2,57	0	0,83		0	2,57	0	0,83	
1022	64	0	2	0	0,96	8,83	0	13,2	-1	0,74	8,14	0	13,2	-1	0,74	8,14
1022	65	0	3,2	0	0,94		0	14	-1	0,74		0	14	-1	0,74	
1022	66	0	3,6	0	0,93		0	18	-1	0,66		0	18	-1	0,66	
1025	73	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0
1025	74	0	0,51	0	0,91		0	1,32	0	0,89		0	1,32	0	0,89	
1025	75	0	0,15	0	0,89		0	5,35	0	0,8		0	5,35	0	0,8	
1029	85	0	2,8	0	0,94	0	0	8,8	0	0,81	0	0	8,8	0	0,81	0
1029	86	7	1,39	0	0		8	1,39	0	0		8	1,39	0	0	
1029	87	4	1,29	0	0		5	3,82	0	0		5	3,82	0	0	
1032	94	11	0,83	0	0	0	11	0,84	0	0	0	11	0,84	0	0	0
1032	95	0	1,62	0	0,97		0	6,95	0	0,85		0	6,95	0	0,85	
1032	96	0	3,66	0	0,93		0	19,66	-1	0,75		0	19,66	-1	0,75	
1036	106	0	0,09	0	0,92	0	0	1,73	0	0,86	0	0	1,73	0	0,86	0
1036	107	6	0,69	0	0		6	0,69	0	0		6	0,69	0	0	
1036	108	0	3,3	0	0,85		0	4,91	0	0,81		0	4,91	0	0,81	
1037	109	0	0,12	0	0,95	0	0	1,55	0	0,83	0	0	1,55	0	0,83	0
1037	110	15	1,18	0	0		16	1,28	0	0		16	1,28	0	0	
1037	111	0	0,14	0	0,94		0	14,22	-1	0,74		0	14,22	-1	0,74	



Рис. 3.17. Совокупность из 9 БС емкостного слоя

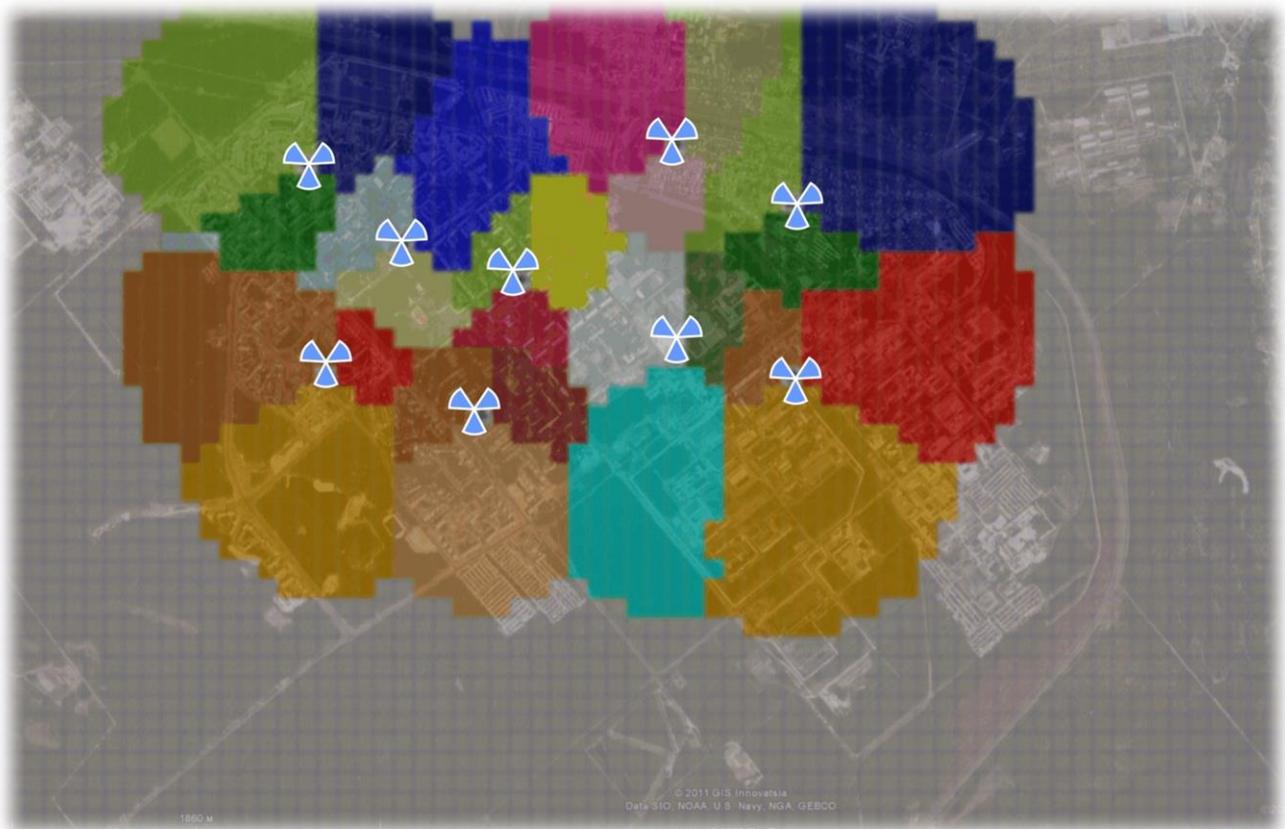


Рис. 3.18. Покрытие, обеспечиваемое 9-ю БС емкостного слоя

Так как емкостной слой в концепции рассматриваемой иерархической сети предназначен для «неподвижных» абонентов, то к нему не предъявлялось требования обеспечения сплошного покрытия.

Результат был достигнут за 46 шагов. Базовые станции емкостного слоя и обеспечиваемое ими покрытие показаны на рис. 3.17 и 3.18, соответственно. Изменения весов для БС, вошедших в оптимальное множество, приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во					
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	
1001	1	10	0,72	0	0	0	10	0,72	0	0	0	10	0,72	0	0	0	
1001	2	1	0,47	0	0		1	0,47	0	0		1	1,33	0	0		0
1001	3	22	1,21	0	0		22	1,21	0	0		22	1,21	0	0		0
1002	4	2	4,71	0	0	0	2	5,11	0	0	0	2	5,11	0	0	0	
1002	5	0	4	0	0,92		0	4	0	0,92		0	8,4	0	0,84		0
1002	6	0	1,07	0	0,78		0	1,07	0	0,78		1	2,3	0	0		0
1004	10	0	3,2	0	0,95	8,56	0	3,2	0	0,95	8,56	0	8,4	0	0,86	0	
1004	11	0	4,41	0	0,92		0	4,41	0	0,92		0	4,42	0	0,91		0
1004	12	0	6,68	0	0,69		0	6,68	0	0,69		0	7,48	0	0,68		0
1005	13	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0	
1005	14	0	1,26	0	0,93		0	1,26	0	0,93		0	1,26	0	0,93		0
1005	15	6	5,24	0	0		6	5,24	0	0		6	5,24	0	0		0
1007	19	0	6,4	0	0,9	8,79	0	7,2	0	0,89	8,78	0	7,2	0	0,89	0	
1007	20	0	2,4	0	0,96		0	2,4	0	0,96		0	8,4	0	0,87		0
1007	21	0	4,4	0	0,93		0	4,4	0	0,93		0	6,4	0	0,9		0
1008	22	0	2,03	0	0,95	0	0	2,03	0	0,95	0	0	4,83	0	0,91	0	
1008	23	7	0,71	0	0		7	0,71	0	0		7	0,71	0	0		0
1008	24	10	0,83	0	0		10	0,83	0	0		10	0,83	0	0		0

Таблица 3.7 (продолжение)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во					
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	
1009	25	9	1,86	0	0	0	9	2,26	0	0	0	9	2,42	0	0	0	
1009	26	0	5,6	0	0,94		0	5,6	0	0,94		0	0	8,43	0		0,89
1009	27	0	9,2	-1	0,9		0	5,6	0	0,92		0	0	6	0		0,91
1010	28	0	2,8	0	0,97	8,86	0	5,2	0	0,94	8,82	0	8	0	0,89	0	
1010	29	0	4,4	0	0,95		0	5,6	0	0,94		0	7,6	0	0,89		
1010	30	0	5,6	0	0,94		0	5,6	0	0,94		0	8,4	0	0,9		
1014	40	0	3,2	0	0,94	8,82	0	3,2	0	0,94	8,82	0	6,8	0	0,87	0	
1014	41	0	3,6	0	0,93		0	3,6	0	0,93		0	4	0	0,92		
1014	42	0	2,8	0	0,95		0	2,8	0	0,95		0	7,6	0	0,86		
1016	46	0	4,4	0	0,91	0	0	6	0	0,88	0	0	8,4	0	0,84	0	
1016	47	3	2,04	0	0		4	2,84	0	0		4	2,84	0	0		
1016	48	0	0,96	0	0,86		0	0,96	0	0,86		0	2,56	0	0,83		
1017	49	0	3,2	0	0,94	8,77	0	4	0	0,92	8,72	0	5,6	0	0,89	0	
1017	50	0	5,2	0	0,9		0	5,2	0	0,9		0	7,2	0	0,84		
1017	51	0	3,6	0	0,93		0	5,2	0	0,9		0	6,4	0	0,88		
1020	58	0	2,8	0	0,94	8,51	0	4	0	0,92	8,46	0	5,6	0	0,89	0	
1020	59	0	3,37	0	0,8		0	3,37	0	0,8		0	3,37	0	0,8		
1020	60	0	3,01	0	0,77		0	4,61	0	0,74		0	5,01	0	0,73		
1021	61	0	3,2	0	0,96	8,85	0	4,4	0	0,95	8,81	0	9,2	0	0,87	0	
1021	62	0	3,2	0	0,96		0	6	0	0,93		0	6	0	0,93		
1021	63	0	6	0	0,93		0	6	0	0,93		0	8,4	0	0,9		
1022	64	0	2	0	0,96	0 (8,8)	0	2,8	0	0,95	0 (8,8)	0	2,8	0	0,95	0	
1022	65	0	3,2	0	0,94		0	3,6	0	0,93		0	3,6	0	0,93		
1022	66	0	3,6	0	0,93		0	4	0	0,92		0	7,2	0	0,86		
1025	73	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0	
1025	74	0	0,51	0	0,91		0	0,51	0	0,91		0	1,32	0	0,89		
1025	75	0	0,15	0	0,89		0	0,15	0	0,89		0	4,15	0	0,82		

Таблица 3.7 (продолжение)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во				
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>				
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ
1027	79	0	3,6	0	0,96	8,81	0	6,4	0	0,93	8,77	0	8,4	0	0,91	0
1027	80	0	6,01	0	0,93		0	6,01	0	0,93		0	7,22	0	0,91	
1027	81	0	6,81	0	0,92		0	7,21	0	0,91		0	7,21	0	0,91	
1028	82	0	3,6	0	0,96	8,88	0	6,8	0	0,92	8,76	0	8,4	0	0,88	6,7
1028	83	0	4,4	0	0,95		0	8	0	0,91		0	9,21	0	0,86	
1028	84	0	2,8	0	0,97		0	6,4	0	0,93		0	6,8	0	0,92	
1029	85	0	2,8	0	0,94	0	0	2,8	0	0,94	0	0	2,8	0	0,94	0
1029	86	7	1,39	0	0		7	1,39	0	0		7	1,39	0	0	
1029	87	4	1,29	0	0		5	1,29	0	0		5	1,29	0	0	
1032	94	11	0,83	0	0	0	11	0,83	0	0	0	11	0,84	0	0	0
1032	95	0	1,62	0	0,97		0	2,42	0	0,96		0	5,75	0	0,87	
1032	96	0	3,66	0	0,93		0	6,06	0	0,9		0	8,06	0	0,88	
1036	106	0	0,09	0	0,92	0	0	0,09	0	0,92	0	0	0,92	0	0,88	0
1036	107	6	0,69	0	0		6	0,69	0	0		6	0,69	0	0	
1036	108	0	3,3	0	0,85		0	3,3	0	0,85		0	3,3	0	0,85	
1037	109	0	0,12	0	0,95	0	0	0,12	0	0,95	0	0	1,15	0	0,83	0
1037	110	15	1,18	0	0		15	1,18	0	0		16	1,28	0	0	
1037	111	0	0,14	0	0,94		0	0,94	0	0,93		0	4,61	0	0,85	
1038	112	6	0,68	0	0	0	6	0,68	0	0	0	6	0,68	0	0	0
1038	113	0	0,21	0	0,83		0	0,21	0	0,83		0	0,21	0	0,83	
1038	114	0	0,1	0	0,92		0	0,1	0	0,92		0	0,12	0	0,9	
1040	118	3	0,31	0	0	0	3	0,31	0	0	0	3	0,31	0	0	0
1040	119	10	0,72	0	0		10	0,72	0	0		12	0,95	0	0	
1040	120	0	0,1	0	0,94		0	0,1	0	0,94		0	0,2	0	0,88	
1041	121	0	10,8	-1	0,88	0 (8,6)	0	8,8	0	0,88	0 (7,7)	0	10,8	0	0,85	0
1041	122	0	5,6	0	0,94		0	6	0	0,93		0	6,4	0	0,93	
1041	123	0	6	0	0,93		0	6,8	0	0,92		0	7,2	0	0,92	

Таблица 3.7 (окончание)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во						
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>						
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ		
1042	124	9	0,75	0	0	0	9	0,75	0	0	0	9	0,77	0	0	0		
1042	125	0	0,97	0	0,86		0	1,37	0	0,85		0	0	1,37	0		0,85	0
1042	126	0	0,19	0	0,86		0	0,99	0	0,84		0	0	2,33	0		0,71	0

Итоговая конфигурация двухуровневой сети показана на рис. 3.19.

Таким образом, построенная двухуровневая сеть обеспечивает покрытие территории не меньше исходной «избыточной» сети и полную утилизацию нагрузки с уровнем блокировок не выше заданного. При этом «подвижные» абоненты средствами сети направляются в сектора БС «верхнего» слоя «покрытия» и не испытывают частых хендверов/перевыборов сот в течение сеанса связи, а «неподвижные» - направляются в сектора БС «нижнего» емкостного слоя.

Как итог – существенно снижаются показатели «количество хендверов на звонок» и «доля повторов передачи пакетов данных», что положительно влияет на уровень предоставления услуг абонентам и их восприятия «качества» и «скорости» сети.

Время счета задачи составило 140 минут.

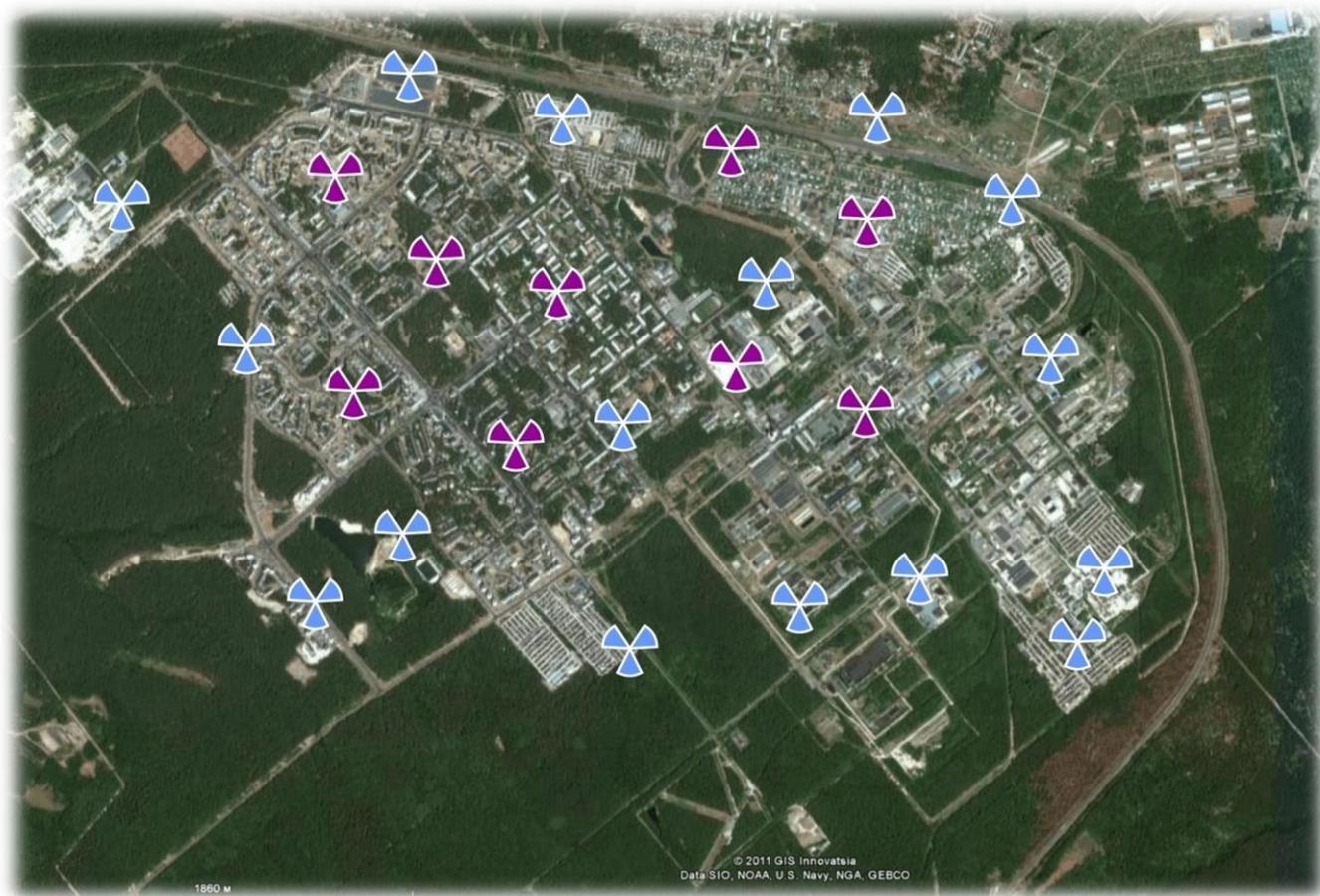


Рис. 3.19. БС итоговой двухуровневой иерархической сети

3.3.3. Интеграция новой БС в существующую сеть

Емкость БС ограничена двумя аспектами: возможностью оборудования БС поддерживать включение необходимого количества приемопередатчиков и количеством частот, доступных для назначения в секторах рассматриваемой БС.

Как правило, второй аспект накладывает более жесткие ограничения. В таком случае вопрос увеличения емкости сети в заданном районе решается строительством новой БС. При этом для обеспечения корректной интеграции новой БС в сеть возникает необходимость скорректировать соседние БС – уменьшить в случае снижения нагрузки их емкость, высвободив при этом задействованные частоты, скорректировать зоны перекрытий секторов и переписать соседские отношения для обеспечения нормальной работы хендверов.

Ниже показано, как предлагаемый алгоритм использовался для решения такой задачи в компании-операторе сети связи в автоматизированном режиме.

Недельный срез ЧНН-ой нагрузки по сети, отображаемый на карте, позволяет выявить области или отдельные сектора с блокировками, превышающими допустимое значение (рис. 3.20). Детальные данные статистики показаны в таблице 3.8. Для снижения блокировок до приемлемого уровня (пусть это будет 2% блокировок) необходимо расширить 4 сектора. При этом два сектора достигнут конфигурации в 4 приемопередатчика, а один – 5. Существующий частотный ресурс рассматриваемого оператора не позволяет обеспечить такие конфигурации без повышения интерференции и, как следствие, снижения качества предоставления услуг в этом районе. Т.е. требуется интеграция новой БС.

Таблица 3.8

Site Id	Sector Id	Traffic	TCH Block Rate	Nmb TRX inst	Nmb TRX req
1	1	8,02	0,87	2	2
1	2	4,945	0	2	2
1	3	3,755	0	2	2
2	4	6,335	0,08	2	2
2	5	5,895	0	2	2
2	6	7,205	0,4	2	2
3	7	5,9	0	2	2
3	8	3,79	0	2	2
3	9	6,795	0,17	2	2
4	10	4,3	0	2	2
4	11	4,72	0	2	2
4	12	7,075	0,28	2	2
5	13	11,615	0	3	3
5	14	5,305	0	2	2

Таблица 3.8 (продолжение)

Site Id	Sector Id	Traffic	TCH Block Rate	Nmb TRX inst	Nmb TRX req
5	15	5,22	0	2	2
6	16	10,4	0	3	3
6	17	28,4	17,8	3	5
6	18	14	0,15	3	3
7	19	1,275	0	2	2
7	20	6,4	0,1	2	2
7	21	4,405	0	2	2
8	22	5,655	0	2	2
8	23	6,805	0,25	2	2
8	24	3,55	0	2	2
9	25	1,69	0	2	2
9	26	3,615	0	2	2
9	27	2,8	0	2	2
10	28	1,705	0	2	2
10	29	3,215	0	2	2
10	30	3,22	0	2	2
11	31	2,81	0	2	2
11	32	20	4,89	3	4
11	33	11,6	0	3	3
12	34	2,575	0	2	2
12	35	2,19	0	2	2
12	36	1	0	2	2
13	37	1,69	0	2	2
13	38	9,605	2,17	2	3
13	39	10,8	0	3	3
14	40	7,64	0,7	2	2
14	41	4,075	0	2	2
14	42	19,255	3,9	3	4
15	43	6,01	0	2	2
15	44	4,275	0	2	2
15	45	4,615	0	2	2

Таблица 3.8 (окончание)

Site Id	Sector Id	Traffic	TCH Block Rate	Nmb TRX inst	Nmb TRX req
16	46	5,805	0	2	2
16	47	2,69	0	2	2
16	48	2,865	0	2	2

Для этого формируется зона поиска площадок-кандидатов для искомой БС (рис. 3.21).

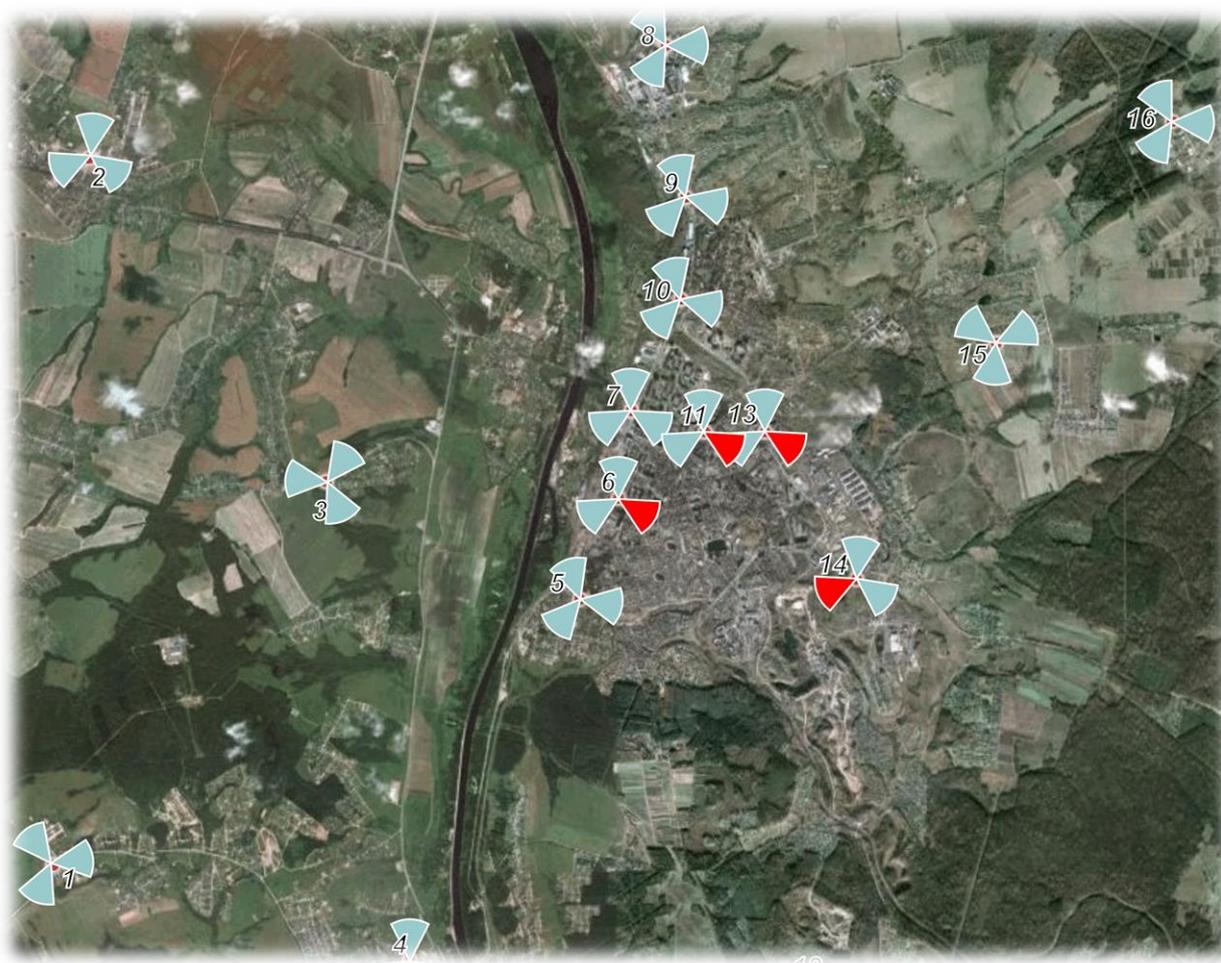


Рис. 3.20. Фрагмент сети, где выявлена группа секторов с блокировками

После этого в заданной области выявляются потенциальные места размещения БС (рис. 3.22).



Рис. 3.21. Зона поиска площадок-кандидатов

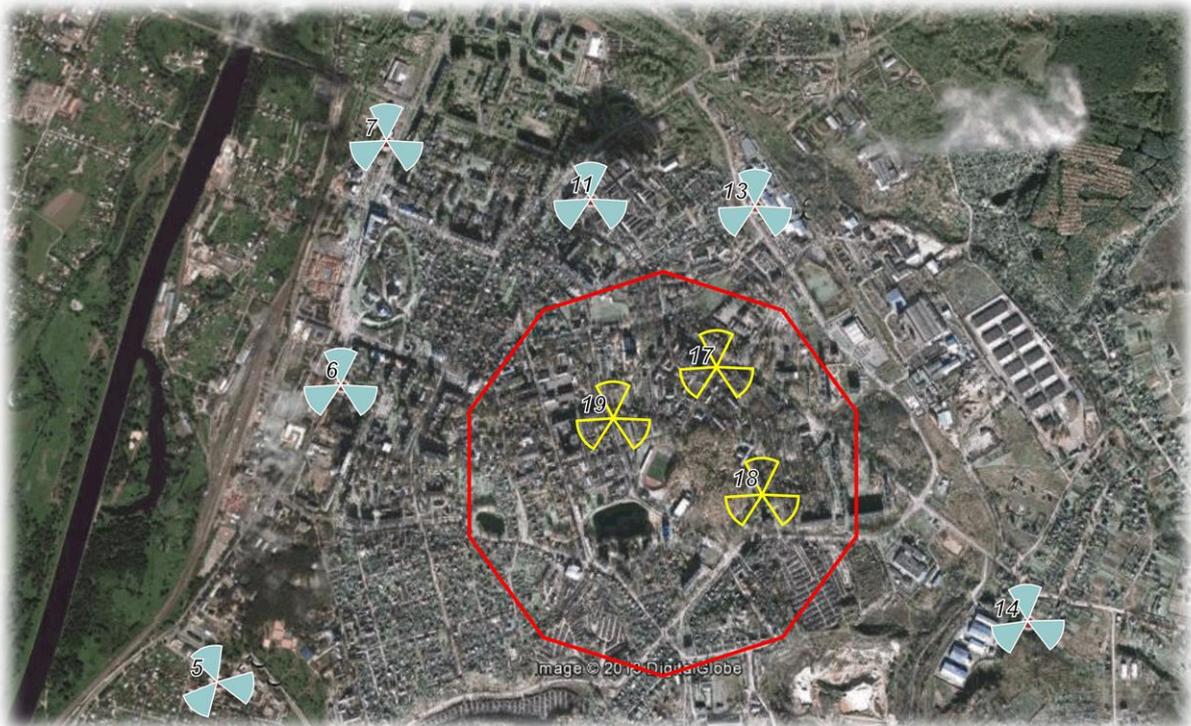


Рис.3.22. Площадки-кандидаты для установки БС

Эти данные, также как и данные по существующим БС, заносятся в программу, реализующую алгоритм. На выходе за 7 шагов (в данном случае оптимальное множество совпало с определенным) получаем оптимальный проект комплексного решения проблемы перегрузок в рассматриваемом районе, который

предполагает добавление одной новой БС и незначительное расширение секторов действующих БС, не вызывающее неприемлемого роста интерференции.

Изменения весов для БС, вошедших в оптимальное множество, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во				
		<i>ServedAreaTot = 6091</i>					<i>ServedAreaTot = 6091</i>					<i>ServedAreaTot = 6091</i>				
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ
1	1	0	8,02	0	0,87	0	0	8,02	0	0,87	0	0	8,02	0	0,87	0
1	2	81	4,95	0	0		81	4,95	0	0		81	4,95	0	0	
1	3	29	3,76	0	0		29	3,76	0	0		29	3,76	0	0	
2	4	64	6,34	0	0	0	64	6,34	0	0	0	64	6,34	0	0	0
2	5	0	5,90	0	0,81		0	5,9	0	0,81		0	5,9	0	0,81	
2	6	70	7,21	0	0		70	7,21	0	0		70	7,21	0	0	
3	7	0	5,50	0	0,81	0	0	5,9	0	0,81	0	0	5,9	0	0,81	0
3	8	0	3,79	0	0,84		0	3,79	0	0,84		0	3,79	0	0,84	
3	9	1	6,80	0	0		1	6,8	0	0		1	6,8	0	0	
4	10	0	4,30	0	0,82	0	0	4,3	0	0,81	0	0	4,3	0	0,81	0
4	11	7	4,72	0	0		7	4,72	0	0		7	4,72	0	0	
4	12	29	7,08	0	0		29	7,08	0	0		29	7,08	0	0	
5	13	0	9,64	-1	0,77	0 (8,45)	0	8,82	0	0,78	0	0	8,82	0	0,78	0
5	14	0	4,90	0	0,77		0	5,31	0	0,75		0	5,31	0	0,75	
5	15	0	3,62	0	0,91		0	5,22	0	0,88		0	5,22	0	0,88	
6	16	0	12,40	-1	0,95	0 (8,78)	0	10,4	0	0,95	0	0	10,4	0	0,95	0
6	17	0	14,00	-1	0,95		0	14	0	0,94		0	14	0	0,94	
6	18	0	14,41	-1	0,88		0	14	0	0,88		0	14	0	0,88	
7	19	0	1,27	0	0,9	0 (8,75)	0	1,28	0	0,89	0	0	1,28	0	0,89	0
7	20	0	4,00	0	0,96		0	6	0	0,96		0	6	0	0,96	
7	21	0	7,22	0	0,89		0	4,41	0	0,91		0	4,41	0	0,91	
8	22	31	5,66	0	0		31	5,66	0	0		31	5,66	0	0	
8	23	0	6,81	0	0,88		0	6,81	0	0,88		0	6,81	0	0,88	
8	24	51	3,55	0	0	51	3,55	0	0	51	3,55	0	0			

Таблица 3.9 (окончание)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во						
		<i>ServedAreaTot = 6091</i>					<i>ServedAreaTot = 6091</i>					<i>ServedAreaTot = 6091</i>						
		Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traff Real	ρ	π	λ		
9	25	0	1,69	0	0,86	0 (8,74)	0	1,69	0	0,86	0	0	1,69	0	0,86	0		
9	26	0	3,62	0	0,92		0	3,62	0	0,92		0	0	3,62	0		0,92	0
9	27	0	2,80	0	0,96		0	2,8	0	0,96		0	0	2,8	0		0,96	0
10	28	0	1,71	0	0,84	0 (8,69)	0	1,71	0	0,84	0	0	1,71	0	0,84	0		
10	29	0	3,22	0	0,93		0	3,22	0	0,93		0	0	3,22	0		0,93	0
10	30	0	3,22	0	0,92		0	3,22	0	0,92		0	0	3,22	0		0,92	0
11	31	0	2,81	0	0,94	0 (8,87)	0	2,81	0	0,94	0	0	2,81	0	0,94	0		
11	32	0	1,60	0	0,97		0	3,6	0	0,97		0	0	3,6	0		0,97	0
11	33	0	4,00	0	0,96		0	8	0	0,95		0	0	8	0		0,95	0
12	34	80	2,58	0	0	0	80	2,58	0	0	0	80	2,58	0	0	0		
12	35	38	2,19	0	0		38	2,19	0	0		38	2,19	0	0		0	
12	36	0	0,98	0	0,75		0	1	0	0,75		0	1	0	0,75		0	
13	37	0	1,29	0	0,86	0 (8,7)	0	1,29	0	0,86	0	0	1,29	0	0,86	0		
13	38	0	6,81	0	0,87		0	8,41	0	0,85		0	8,41	0	0,85		0	
13	39	0	1,60	0	0,97		0	4,4	0	0,95		0	4,4	0	0,95		0	
14	40	0	5,66	0	0,87	0	0	7,66	0	0,85	0	0	7,66	0	0,85	0		
14	41	3	4,06	0	0		3	4,06	0	0		3	4,06	0	0		0	
14	42	0	11,29	-1	0,77		0	12,5	0	0,74		0	12,5	0	0,74		0	
15	43	12	6,01	0	0	0	12	6,01	0	0	0	12	6,01	0	0	0		
15	44	2	4,26	0	0		2	4,26	0	0		2	4,26	0	0		0	
15	45	0	4,62	0	0,73		0	4,62	0	0,73		0	4,62	0	0,73		0	
16	46	21	5,81	0	0	0	21	5,81	0	0	0	21	5,81	0	0	0		
16	47	0	2,69	0	0,68		0	2,69	0	0,68		0	2,69	0	0,68		0	
16	48	5	2,87	0	0		5	2,87	0	0		5	2,87	0	0		0	
19	55	0	8,00	0	0,98	8,86	0	8	0	0,97	5,7	0	8	0	0,97	5,7		
19	56	0	8,40	0	0,97		0	22,8	0	0,84		0	22,8	0	0,84		0	
19	57	0	20,00	-1	0,91		0	18,8	0	0,89		0	18,8	0	0,89		0	

Красным цветом выделены существующие БС, которые нельзя удалять. Их веса λ принудительно обнуляются.

В табл. 3.10 приведены в сравнении два варианта: оптимальный вариант сети, достигаемый путем добавления новой БС, и вариант модернизации сети без добавления новой БС.

Таблица 3.10

I. Проект оптимальной сети (+1 БС)

Site	Sector	Traffic	#TRXreq
1	1	8,02	2
1	2	4,945	2
1	3	3,755	2
2	4	6,335	2
2	5	5,895	2
2	6	7,205	2
3	7	5,9	2
3	8	3,79	2
3	9	6,795	2
4	10	4,3	2
4	11	4,72	2
4	12	7,075	2
5	13	8,815	2
5	14	5,305	2
5	15	5,22	2
6	16	10,4	3
6	17	14	3
6	18	14	3
7	19	1,275	2
7	20	6	2
7	21	4,405	2
8	22	5,655	2
8	23	6,805	2
8	24	3,55	2
9	25	1,69	2

II. Проект расширения исходной сети

Site	Sector	Traffic	#TRXreq
1	1	8,02	2
1	2	4,945	2
1	3	3,755	2
2	4	6,335	2
2	5	5,895	2
2	6	7,205	2
3	7	5,9	2
3	8	3,79	2
3	9	6,795	2
4	10	4,3	2
4	11	4,72	2
4	12	7,075	2
5	13	11,615	3
5	14	5,305	2
5	15	5,22	2
6	16	10,4	3
6	17	28,4	5
6	18	14	3
7	19	1,275	2
7	20	6,4	2
7	21	4,405	2
8	22	5,655	2
8	23	6,805	2
8	24	3,55	2
9	25	1,69	2

Таблица 3.10 (окончание)

I. Проект оптимальной сети (+1 БС)

Site	Sector	Traffic	#TRXreq
9	26	3,615	2
9	27	2,8	2
10	28	1,705	2
10	29	3,215	2
10	30	3,22	2
11	31	2,81	2
11	32	3,6	2
11	33	8	2
12	34	2,575	2
12	35	2,19	2
12	36	1	2
13	37	1,285	2
13	38	8,405	2
13	39	4,4	2
14	40	7,66	2
14	41	4,06	2
14	42	12,455	3
15	43	6,01	2
15	44	4,26	2
15	45	4,615	2
16	46	5,805	2
16	47	2,69	2
16	48	2,865	2
19	55	8	2
19	56	22,8	3
19	57	18,8	4

II. Проект расширения исходной сети

Site	Sector	Traffic	#TRXreq
9	26	3,615	2
9	27	2,8	2
10	28	1,705	2
10	29	3,215	2
10	30	3,22	2
11	31	2,81	2
11	32	20	4
11	33	11,6	3
12	34	2,575	2
12	35	2,19	2
12	36	1	2
13	37	1,69	2
13	38	9,605	3
13	39	10,8	3
14	40	7,64	2
14	41	4,075	2
14	42	19,255	4
15	43	6,01	2
15	44	4,275	2
15	45	4,615	2
16	46	5,805	2
16	47	2,69	2
16	48	2,865	2

Условные обозначения в таблице 3.10:

	- расширяемые сектора
	- новая БС
	- кол-во TRX меньше, чем в проекте расширения исходной сети

Итоговая конфигурация фрагмента сети приведена на рис. 3.23. Время счета задачи в разработанном программном комплексе составило 10 минут.

Преимущество использования алгоритма в том, что отпадает необходимость заниматься анализом и решением каждой конкретной ситуации отдельно. Алгоритм позволяет «проработать» всю сеть одновременно, увязав между собой все возникшие ситуации, при этом требуя минимального участия человека.



Рис. 3.23. Фрагмент сети в итоговой конфигурации

3.3.4. Проект развертывания сети 4-го поколения McWiLL

В последние годы в мире бурными темпами развиваются сети беспроводного широкополосного доступа, такие, например, как Wi-Fi, WiMax, LTE, McWiLL и др. [1]. Одним из важнейших вопросов при создании такого рода сетей является вопрос частотно-территориального планирования.

Далее показано, как разработанный алгоритм позволяет синтезировать сеть ШПД McWiLL стандарта SCDMA, относящуюся к сетям беспроводной связи четвертого поколения. Система McWiLL [2] реализуется с использованием таких передовых технологий как «смарт-антенны», многостационарный доступ TDD CS-OFDMA, адаптивная модуляция, динамическое предоставление каналов,

SDMA и MIMO. Благодаря применению указанных технологий система McWiLL обеспечивает одновременное предоставление голосовых услуг и услуг передачи данных, эффективное сочетание узкополосных и широкополосных служб, большое (40-80 км) покрытие за счет возможности использования низких диапазонов частот 300/400 МГц, высокую эффективность использования спектра (до 15 Мбит/с в полосе 5 МГц), поддержку обслуживания высокоподвижных абонентов, невысокую стоимость абонентских терминалов.

Особенности стандарта McWiLL, дополняемые применением эффективных алгоритмов подавления помех, специальной структурой кадра и режимом динамического назначения каналов, позволяют развертывать сети с коэффициентом повторного использования частот $N = 1$.

Для оценки объемов строительства при развертывании сети McWiLL в г. Заречный Пензенской области было определено исходное множество площадок-кандидатов в 42 позиции. Исходная «избыточная» сеть показана на рис. 3.24.

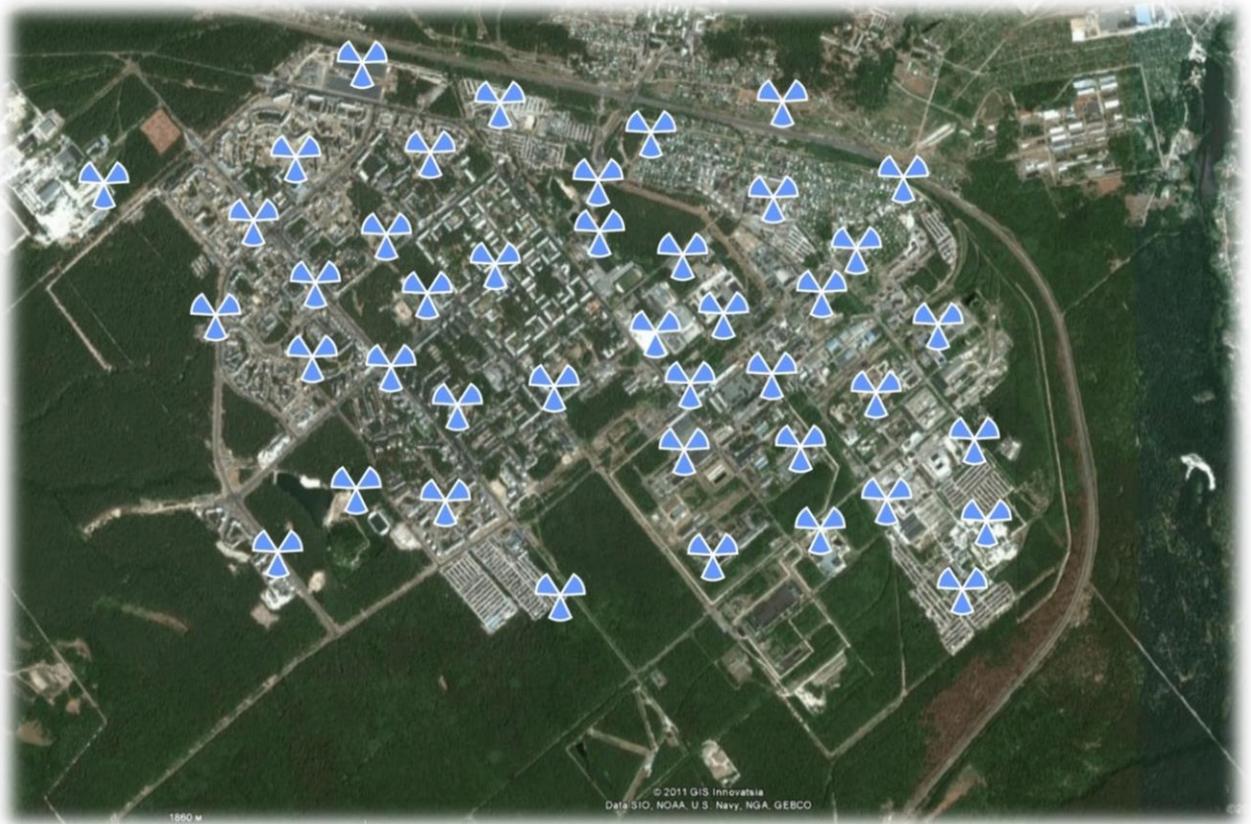


Рис. 3.24. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС



Рис. 3.25. Определимое множество, включающее 18 БС



Рис. 3.26. Оптимальное множество, включающее 16 БС

Согласно алгоритму сначала за 19 шагов было выделено определенное множество в 18 БС (рис. 3.25), затем за 7 шагов - искомое оптимальное множество в 16 БС (рис. 3.26).

В таблице 3.11 показаны изменения весов для тех БС, которые вошли в оптимальное множество.

Таблица 3.11

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во				
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>				
		Uniq Cov Area	Traffic Real	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traffic cReal	ρ	π	λ	Uniq Cov Area	Traffic cReal	ρ	π	λ
1001	1	10	0,72	0	0	0	10	1,12	0	0	0	10	1,12	0	0	0
1001	2	1	0,47	0	0		1	1,33	0	0		2	7,42	0	0	
1001	3	22	1,21	0	0		22	1,21	0	0		22	1,21	0	0	
1002	4	2	4,71	0	0	0	2	6,71	0	0	0	2	6,71	0	0	0
1002	5	0	4	0	0,92		0	16	0	0,7		0	23,6	0	0,56	
1002	6	0	1,07	0	0,78		1	2,3	0	0		1	2,3	0	0	
1005	13	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0	7	0,64	0	0	0
1005	14	0	1,26	0	0,93		0	1,26	0	0,93		0	1,26	0	0,93	
1005	15	6	5,24	0	0		6	5,24	0	0		6	5,24	0	0	
1008	22	0	2,03	0	0,95	0	0	8,83	0	0,85	0	0	24,83	0	0,61	0
1008	23	7	0,71	0	0		7	1,11	0	0		7	1,11	0	0	
1008	24	10	0,83	0	0		10	0,83	0	0		11	2,17	0	0	
1009	25	9	1,86	0	0	0	9	2,02	0	0	0	9	2,02	0	0	0
1009	26	0	5,6	0	0,94		0	30,03	0	0,65		7	47,23	0	0	
1009	27	0	9,2	0	0,9		0	18,8	0	0,79		0	18,8	0	0,79	
1016	46	0	4,4	0	0,91	0	0	9,2	0	0,82	0	0	24	0	0,53	0
1016	47	3	2,04	0	0		4	2,84	0	0		4	2,84	0	0	
1016	48	0	0,96	0	0,86		0	2,56	0	0,83		0	2,57	0	0,83	
1020	58	0	2,8	0	0,94	2,51	0	6,4	0	0,87	2,36	0	6,8	0	0,86	2,35
1020	59	0	3,37	0	0,8		0	4,58	0	0,76		0	4,58	0	0,76	
1020	60	0	3,01	0	0,77		0	5,01	0	0,73		0	5,01	0	0,73	
1022	64	0	2	0	0,96	2,83	0	22	0	0,57	2,16	0	24,4	0	0,52	1,28
1022	65	0	3,2	0	0,94		0	12,8	0	0,76		0	12,8	0	0,76	
1022	66	0	3,6	0	0,93		0	9,2	0	0,83		1	14,4	0	0	

Таблица 3.11 (окончание)

Site	Sector	Начальное мн-во					Определимое мн-во					Оптимальное мн-во						
		<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>					<i>ServedAreaTot = 2364</i>						
		UniqCovArea	TrafficReal	ρ	π	λ	UniqCovArea	TrafficReal	ρ	π	λ	UniqCovArea	TrafficReal	ρ	π	λ		
1025	73	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0	0	4	0,61	0	0			
1025	74	0	0,51	0	0,91		0	1,32	0	0,89		0	0	1,32	0	0,89	0	
1025	75	0	0,15	0	0,89		0	10,15	0	0,71		0	0	10,15	0	0,71	0	
1029	85	0	2,8	0	0,94	0	0	8	0	0,83	0	0	8	0	0,83	0		
1029	86	7	1,39	0	0		8	1,39	0	0		8	1,39	0	0		0	
1029	87	4	1,29	0	0		5	1,29	0	0		5	1,29	0	0		0	
1032	94	11	0,83	0	0	0	11	0,84	0	0	0	11	0,84	0	0	0		
1032	95	0	1,62	0	0,97		0	6,95	0	0,85		0	0	6,95	0		0,85	0
1032	96	0	3,66	0	0,93		0	23,26	0	0,71		0	0	23,26	0		0,71	0
1036	106	0	0,09	0	0,92	0	0	1,73	0	0,86	0	0	1,73	0	0,86	0		
1036	107	6	0,69	0	0		6	0,69	0	0		6	0,69	0	0		0	
1036	108	0	3,3	0	0,85		0	4,91	0	0,81		0	0	4,91	0		0,81	0
1037	109	0	0,12	0	0,95	0	0	1,55	0	0,83	0	0	1,55	0	0,83	0		
1037	110	15	1,18	0	0		16	1,28	0	0		16	1,28	0	0		0	
1037	111	0	0,14	0	0,94		0	14,22	0	0,74		0	0	14,22	0		0,74	0
1038	112	6	0,68	0	0	0	6	0,68	0	0	0	6	0,68	0	0	0		
1038	113	0	0,21	0	0,83		0	0,21	0	0,83		0	0	0,21	0		0,83	0
1038	114	0	0,1	0	0,92		0	0,12	0	0,9		0	0	0,12	0		0,9	0
1040	118	3	0,31	0	0	0	3	0,31	0	0	0	3	0,31	0	0	0		
1040	119	10	0,72	0	0		12	0,95	0	0		12	0,95	0	0		0	
1040	120	0	0,1	0	0,94		0	0,2	0	0,88		0	0	0,2	0		0,88	0
1042	124	9	0,75	0	0	0	9	0,77	0	0	0	9	0,77	0	0	0		
1042	125	0	0,97	0	0,86		0	3,77	0	0,8		0	0	3,77	0		0,8	0
1042	126	0	0,19	0	0,86		0	5,53	0	0,65		0	0	5,53	0		0,65	0

Из таблицы 3.11 видно, что площадь обслуживания, обеспечиваемая БС оптимального множества, совпадает с таковой исходного множества. Значение веса $\rho = 0$ у представленных секторов говорит об отсутствии перегрузок по трафику для рассматриваемых конфигураций сети.

Таким образом, для обслуживания с заданным уровнем качества рассматриваемой территории достаточно 16 БС. Исходя из этих данных, можно определить бюджет и сроки реализации проекта по развертыванию сети McWiLL.

Время счета задачи в разработанном программном комплексе составило 40 минут.

Выводы к главе 3

1. Использование теории монотонных систем позволило разработать автоматизированный алгоритм синтеза сети радиодоступа, успешно применимый как к сетям второго, так и четвертого поколений, позволяющий за конечное время определить оптимальное количество и места размещения БС.
2. Предложенный алгоритм является перспективным как для решения задач проектирования сетей подвижной радиосвязи, так и при эксплуатации этих сетей для решения задач по перепланированию.

ГЛАВА 4

2.2.1. Модель следящей системы

Непрекращающийся рост абонентской базы операторов сетей мобильной связи и все более обостряющаяся конкуренция на рынке предоставления услуг связи требуют от операторов расширения территории обслуживания и улучшения качества радиопокрытия, постоянного увеличения емкости сетей, повышения качества предоставляемых услуг и введения новых.

При этом, как правило, имеющийся у операторов частотный ресурс остается неизменным. Экстенсивный путь развития сетей в такой ситуации приводит к недопустимому повышению уровня внутрисистемной интерференции и существенному снижению качества связи.

Для борьбы с этими негативными последствиями приходится пересматривать частотно-территориальный план сетей, их топологию, что требует значительных человеческих, временных и финансовых затрат. Как следствие – недостаточно быстрая реакция на происходящие изменения и снижение эффективности работы сети.

В связи с этим интересной представляется идея автоматизированной системы, способной отслеживать происходящие на сети изменения, оценивать работу сети и выдавать рекомендации по эффективной модернизации сети в режиме «реального» времени.

Рассмотрим предприятие связи в целом как систему управления (рис. 4.1).

В общем случае поведение системы определяется *целью управления, характером возмущения, свойствами управляющего органа и объекта управления.*

В качестве объекта управления рассмотрим сеть мобильной сотовой связи как совокупность приемо-передающих базовых станций и транспортной системы до уровня контроллеров базовых станций. Задача такой системы – обслуживание заявок абонентов с заданным уровнем качества.

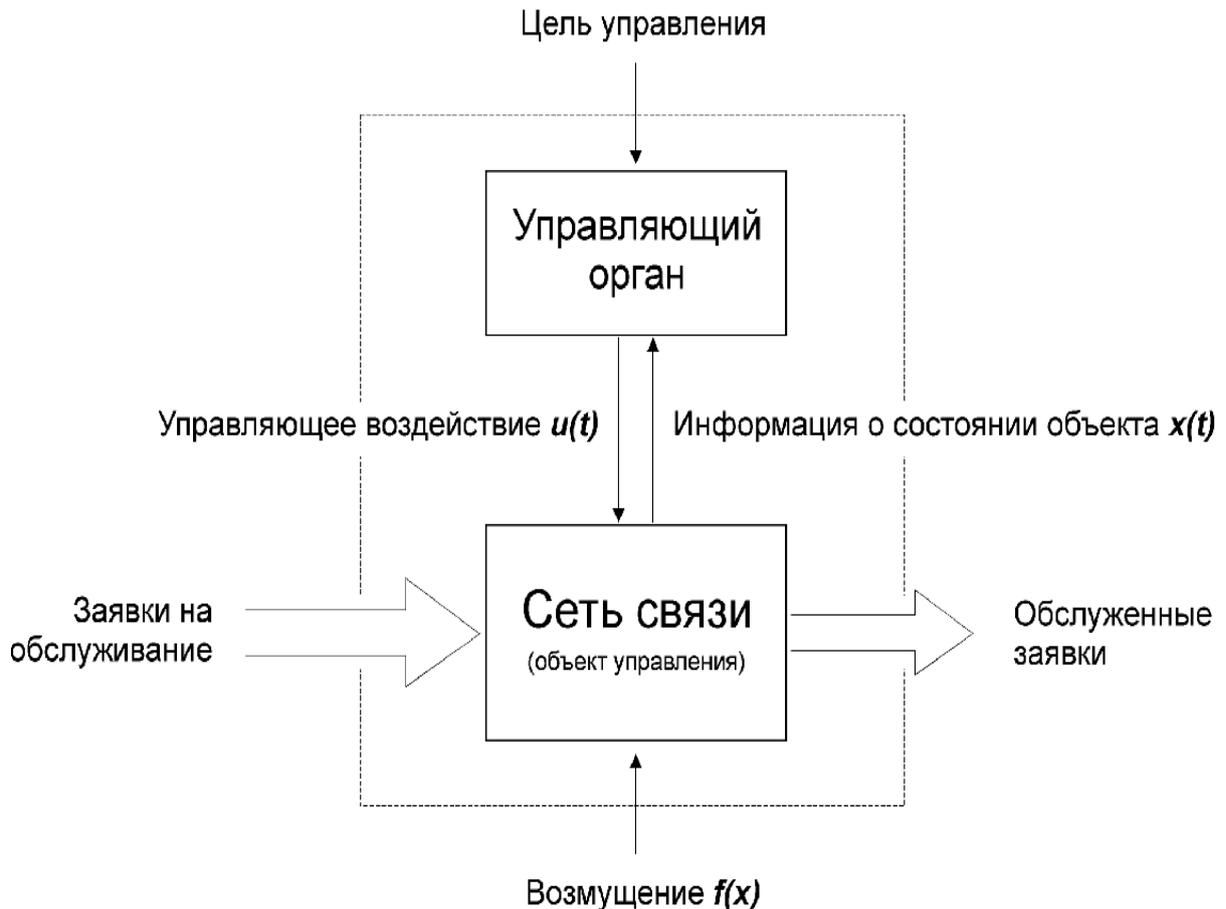


Рис. 4.1. Сеть связи как система управления

Целью управления определим поддержание сети связи в состоянии, при котором уровень качества обслуживания заявок абонентов будет не ниже заданного при условии того, что развитие и модернизация сети производится в рамках установленного бюджета.

Определенный таким образом объект управления - открытая система, что означает, что объект подвержен действию возмущений со стороны окружающей среды и это влияние на объект не поддается контролю. Под возмущениями будем понимать такие события как резкие флуктуации трафика, аварии на сети, задержки в поставке оборудования, затягивание сроков ввода в эксплуатацию объектов связи и т.д.

В рамках решаемой задачи возмущающими воздействиями можно пренебречь из-за инерционности цикла управления от момента обнаружения отклонения от целевого состояния системы до момента реализации управляющего воздействия, хотя задача уменьшения времени

реакции на происходящие изменения является одной из основных целей рассматриваемой задачи.

Управляющий орган можно представить в виде подсистемы, изображенной на рис. 4.2.

Функции управляющего органа возможно реализовать в виде программного комплекса, который получает информацию о состоянии сети в виде статистических данных и показаний счетчиков процессов, происходящих в сети, сравнивает ключевые показатели качества работы сети с показателями качества, заданными в цели управления, и, в случае несоответствия, на основании имеющегося алгоритма синтезирует варианты управляющих воздействий. На основании этих вариантов лицо, ответственное за принятие решения по модернизации сети, принимает решение о тех или иных действиях.

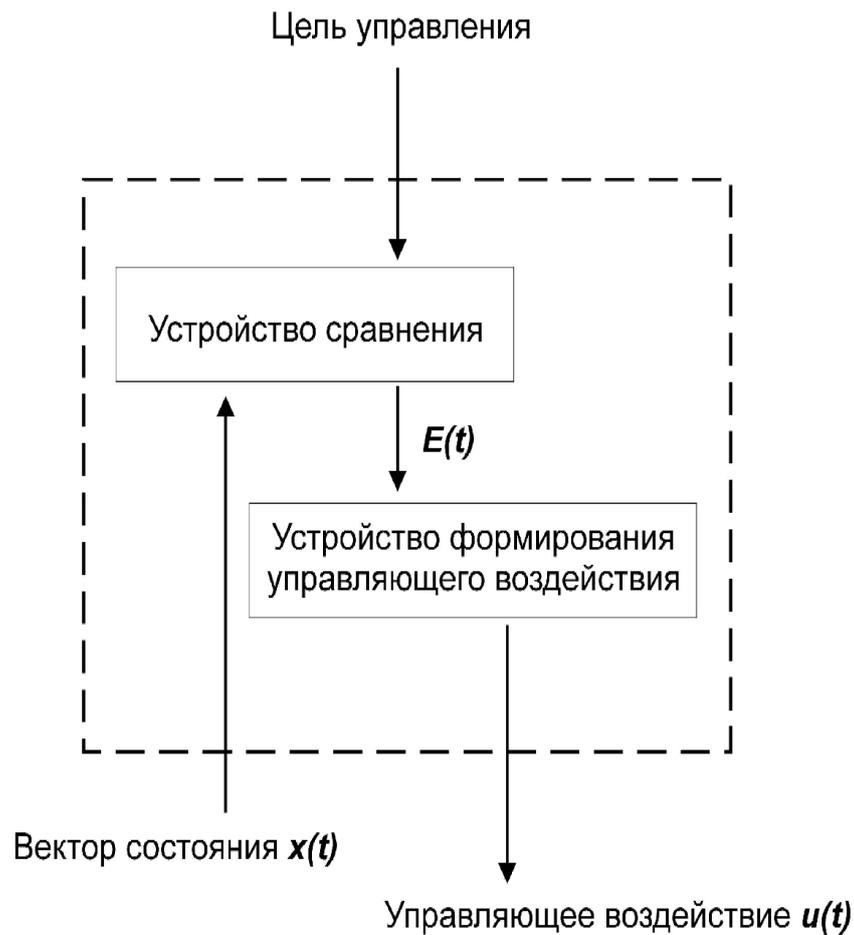


Рис. 4.2. Управляющий орган

Информация о состоянии объекта собирается и хранится в нескольких базах данных и запрашивается оттуда управляющим органом по необходимости.

Предусматривается три базы данных:

- БД по физическим параметрам оборудования;
- БД по логическим настройкам оборудования и процессов в сети;
- БД по статистике и счетчикам процессов в сети.

Управляющее воздействие – отчет, генерируемый программным комплексом, содержащий следующую информацию:

- перечень базовых станций, на которых необходимо добавить/убрать передатчики;
- координаты мест установки новых базовых станций и их конфигурации;
- рекомендации по изменению основных параметров базовых станций;
- оптимизированный частотный план.

Алгоритм формирования управляющего воздействия представляет собой набор нескольких методик, построенных на основе изложенного в главе 2.

2.3.1. Общая схема «непрерывного» процесса оптимизации сети связи

На рис. 4.3 представлены исходные данные, их источники и способы обработки, необходимые для формирования входных данных для оптимизационного алгоритма, на основании и с учетом которых может проводиться оптимизация сети сотовой подвижной связи стандарта GSM. Рассмотрим каждый из элементов схемы подробнее.

База данных по статистике – хранилище статистических данных о работе сети. Используется для контроля, анализа и отчетности на

ежедневной основе. Процесс занесения данных, как правило, автоматизирован и производится на ежедневной или ежечасной основе.

Целевые значения – набор ключевых параметров работы сети и их значения, определяющие качество работы сети. Применительно к рассматриваемой задаче это блокировки на разговорных каналах.

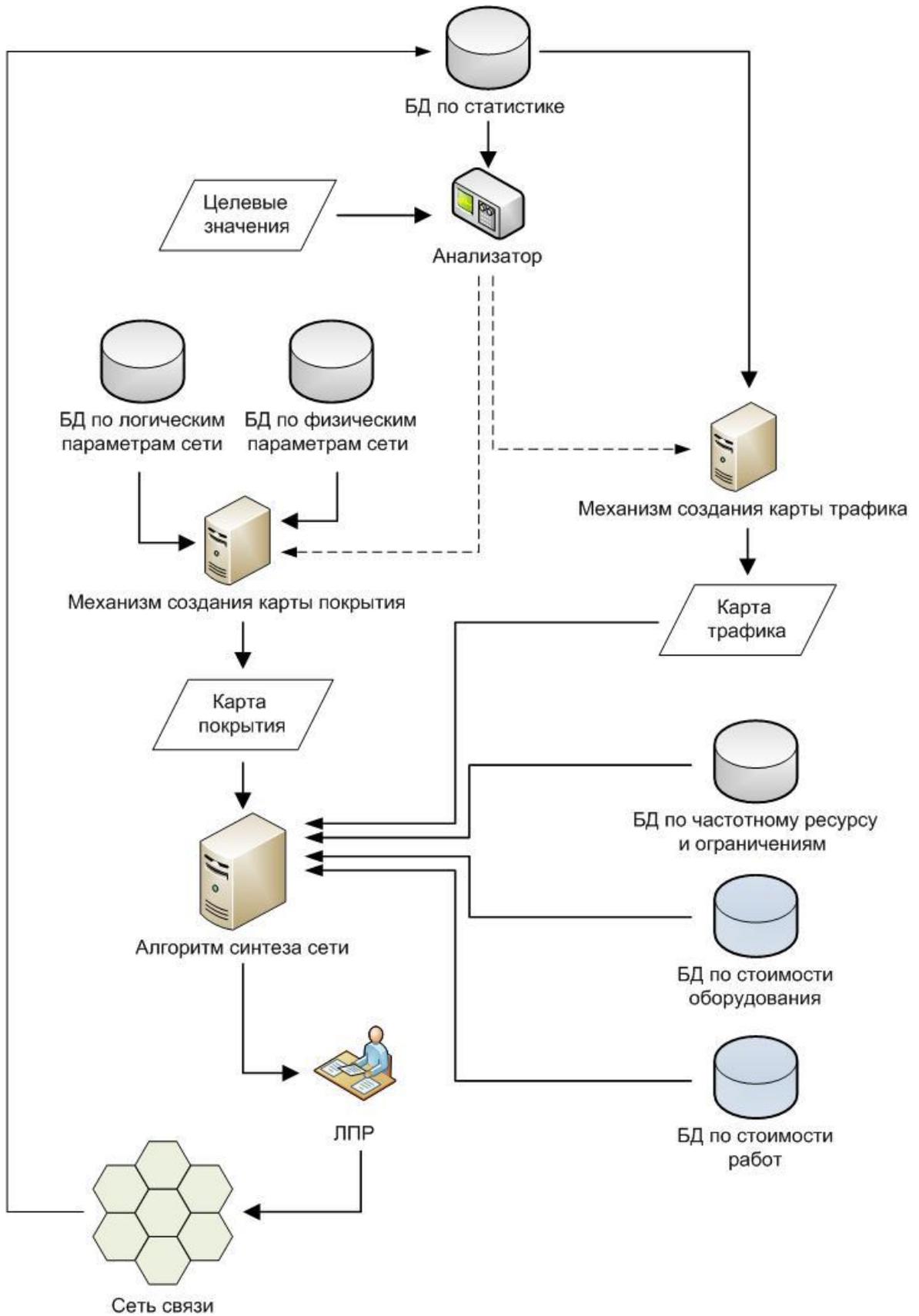


Рис. 4.3. Общая схема организации оптимизационного процесса

Анализатор – механизм оценки ключевых параметров работы сети, получаемых из данных статистики, и сравнения их с заданными целевыми показателями. В случае обнаружения несоответствия между фактическими и целевыми показателями анализатор автоматически инициирует процедуру синтеза оптимальной сети, отвечающей изменившимся внешним условиям, запуская механизмы расчета карт покрытия и трафика.

Механизм создания карты покрытия – механизм получения данных по покрытию, т.е. по определению зон покрытия секторов базовых станций, рассматриваемых в проекте. Предполагается, что оператор сети связи уже имеет такой механизм, и он полностью настроен - снабжен цифровыми картами местности в нужном масштабе и с необходимой детализацией, определены и откалиброваны модели расчета уровней радиосигналов. Входными данными для этого механизма являются *логические* и *физические параметры сети*. На выходе получаем данные по покрытию установленного формата в виде текстового файла.

Логические параметры сети – это параметры работы сети, задаваемые в базе данных контроллеров базовых станций, влияющие на формирование зоны обслуживания. К ним относятся минимальный уровень доступа в ячейку, допустимая мощность излучения передатчиков и др.

Физические параметры сети – параметры размещения оборудования базовых станций: координаты сайтов, высоты подвеса антенн, азимуты, углы механического и электрического наклона и типы антенн, типы оборудования базовых станций и т.д.

Механизм создания карты трафика – механизм получения данных по трафику. Как правило, он интегрирован с механизмом создания карты покрытия в единый программный продукт. Предполагается, что он тоже полностью настроен.

Входными данными для него могут быть как реальные статистические данные, получаемые непосредственно из сети, так и какие-либо прогнозные значения, например, полученные от отдела маркетинга, а также данные по покрытию.

На выходе этого механизма получаем карту трафика в установленной форме в виде текстового файла.

Алгоритм синтеза сети - ключевой элемент схемы. Именно он реализует процесс синтеза оптимальной сети. Оптимизация ведется на основании карт покрытия, трафика и частотного ресурса. Кроме того, могут учитываться дополнительные параметры, например, ограничения по бюджету, стоимость оборудования и др.

На выходе алгоритма синтеза сети получаем набор рекомендаций о необходимых изменениях, внесение которых должно привести сеть в состояние, наилучшим образом отвечающее текущим условиям.

Полученный набор рекомендаций рассматривается лицом, принимающим решение (ЛПР). Это эксперт, который оценивает выполнимость предложенных алгоритмом изменений на сети, их стоимость и ценность для компании-оператора. Если эксперт дает положительное заключение, то предложения внедряются на сети. После этого собирается статистика и цикл повторяется.

Самым сложным с точки зрения реализации описанной выше схемы является налаживание автоматического взаимодействия с программными продуктами, используемыми оператором сети.

Для проведения тестирования предлагаемого алгоритма оптимизации, его оценки и наладки все из приведенных на схеме механизмов были созданы специально. Все входные данные и их набор максимально приближены к реальным данным и бизнес-процессам, используемым операторами сетей связи.

4.3. Реализация процесса на примере Костромы

В качестве иллюстрации работы предложенной схемы воспользуемся двумя рассмотренными в главе 3 примерами по г. Костроме.

Итак, рассматривается вопрос о развертывании сети связи стандарта GSM в г. Костроме. Определена территория, на которой необходимо обеспечить сплошное покрытие, выявлены 30 потенциальных мест

установки БС. На начальном этапе нагрузка на сеть ожидается небольшой (пример 1 в главе 3).

Задается целевое значение на блокировки по разговорным каналам – не более 2%. Определяются исходные физические и логические параметры сети. Настраиваются механизмы создания карт покрытия и трафика, определяются частотные ограничения – не более двух частот в секторе, задаются стоимости оборудования и работ. Запускается процедура синтеза оптимальной сети.

На выходе алгоритма синтеза сети получаем проект сети из 10 БС с указанием координат их размещения, высотами, азимутами, количеством приемопередатчиков в каждом секторе, частотно-территориальным планом, стоимостью работ и расходами на оборудование (рис. 4.4).

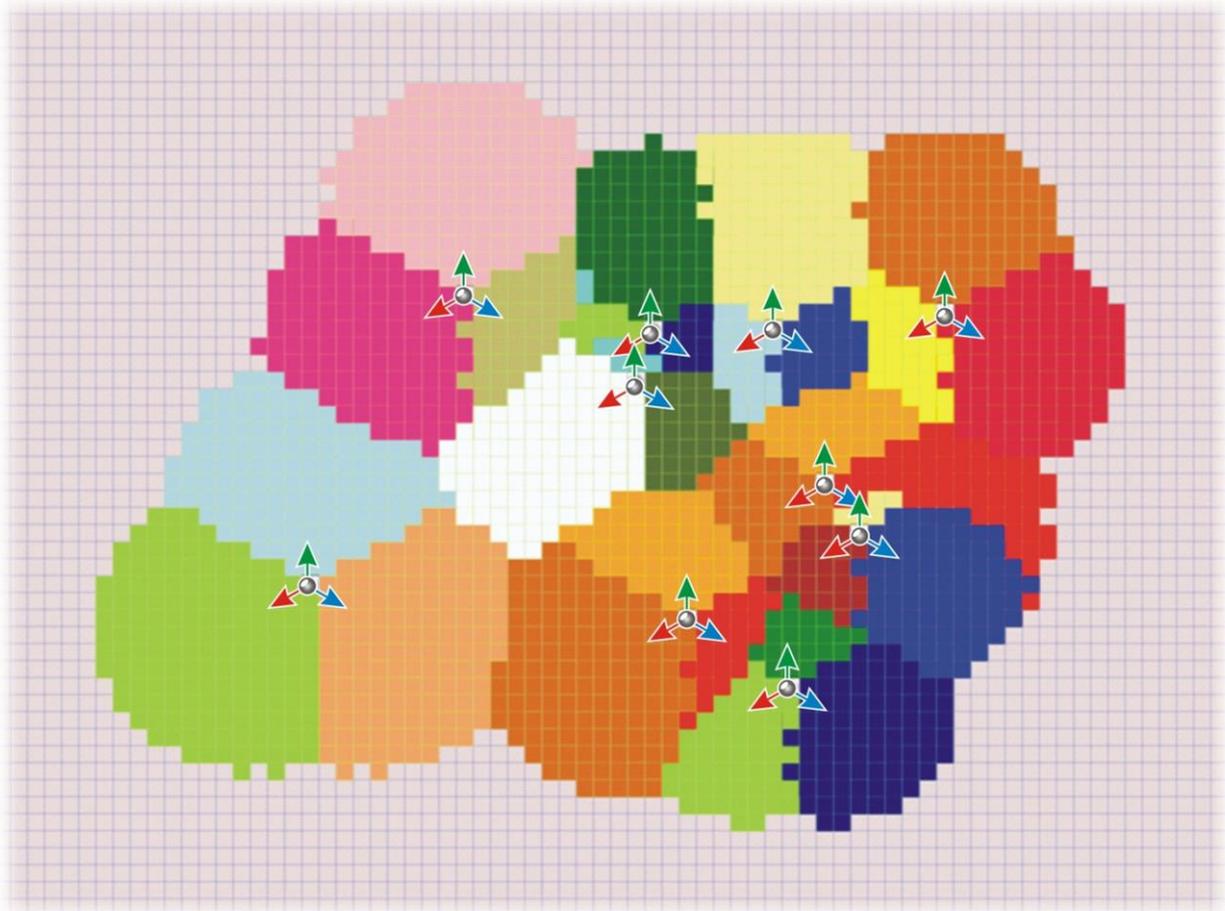


Рис. 4.4. Проект сети на этапе развертывания

По проекту строится сеть и вводится в эксплуатацию.

После запуска сети появляется возможность получать статистические данные о работе сети, проводить полевые измерения, на основании которых

калибруются модели расчета покрытия, появляется информация о реальном трафике.

Предположим, что нагрузка в центральной части города оказалась выше прогнозной (пример 2 в главе 3). Это приводит к тому, что *Анализатор* детектирует несоответствие реальных показателей блокировок на разговорных каналах с целевыми и инициирует синтез новой сети. В результате получаем рекомендации о строительстве двух новых БС, которые при существующих частотных ограничениях, по расчетам, позволят привести показатели качества сети к целевым (рис. 4.5).

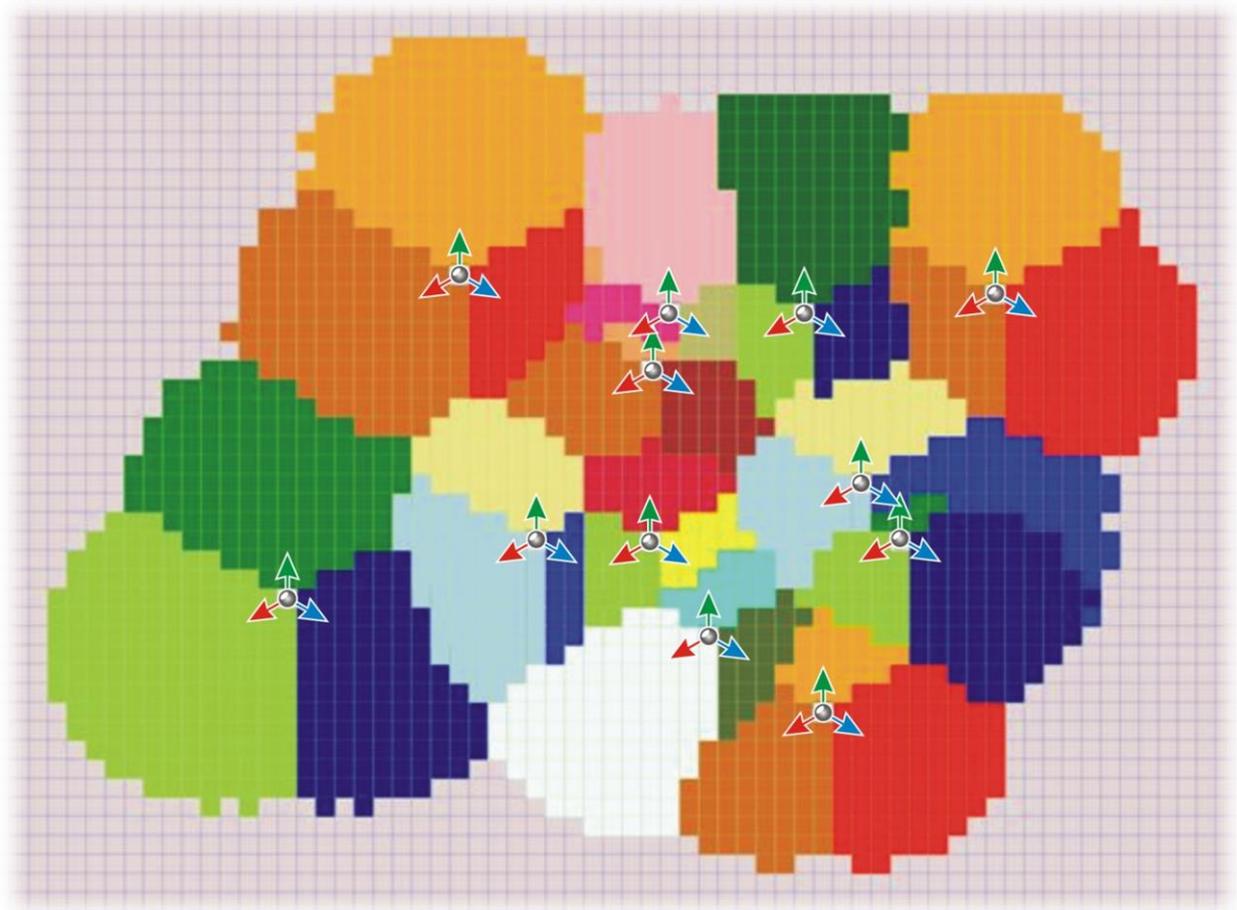


Рис. 4.5. Проект сети с двумя дополнительными БС

Далее следует внедрение рекомендаций – строительство двух дополнительных БС. Затем собирается статистика, *Анализатор* делает оценку и т.д.

Отметим, что схема без обратной связи и *Анализатора* может использоваться для ситуационного моделирования – например, для

проведения оценки потенциальных расходов и объемов строительства исходя из прогнозов маркетинга по росту трафика.

Выводы к главе 4

1. На основе разработанного алгоритма можно создать следящую систему, которая позволит в автоматическом режиме генерировать рекомендации по оптимизации топологии, частотно-территориального плана и конфигурации сети в зависимости от меняющейся нагрузки.
2. Разработанный алгоритм также можно применить для ситуационного моделирования широкого круга задач и процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все задачи, сформулированные в настоящей диссертационной работе, решены.

Проведенные исследования позволили выявить проблемы, возникающие в процессе роста и развития современных сетей подвижной радиосвязи, проанализировать возможности современного программного обеспечения по проектированию и оптимизации, методы его использования. На основе изученного традиционного подхода к планированию предложено усовершенствование, которое легло в основу разработанного алгоритма синтеза сети оптимальной топологии и конфигурации.

По результатам исследования был сформулирован и формализован критерий оптимальности сети подвижной радиосвязи, заключающийся в организации сети радиодоступа с минимальным количеством базовых станций, каждая из которых имеет по три сектора в конфигурации, позволяющей обслуживать трафик с заданным уровнем качества, одновременно учитывающей имеющийся у оператора сети частотный ресурс и обеспечивающей, соответственно, заданный уровень интерференции.

Для обеспечения возможности проведения тестирования разрабатываемого алгоритма были созданы модели трафика, расчета уровня сигнала сети и привязки трафика. На основе этих моделей было создано соответствующее программное обеспечение.

В соответствии с построенными моделями и сформулированным критерием оптимальности на основе теории монотонных систем был разработан алгоритм синтеза оптимальной сети и проведен анализ его рабочих характеристик, показавший его полиномиальную вычислительную сложность.

Для подтверждения работоспособности синтезированного алгоритма был детально рассмотрен пример построения оптимальной сети радиодоступа стандарта GSM для г. Костромы. Результаты подтвердили эффективность созданного алгоритма.

В дополнение к этому были бы продемонстрированы применение алгоритма для решения задач проектирования простых и иерархических сетей, интеграции новых БС в существующее сетевое окружение. Кроме того, на примере сети McWiLL было показано, что предложенный алгоритм может использоваться для создания проектов сетей четвертого поколения.

По результатам использования алгоритма была предложена модель следящей системы, позволяющая проводить оптимизацию сети в автоматизированном режиме. Принципы работы следящей системы были проиллюстрированы на примере.

Таким образом, все задачи, поставленные в рамках диссертационной работы, были выполнены, цель построения алгоритма синтеза оптимальной сети подвижной радиосвязи с низкой вычислительной сложностью достигнута.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Глава 1

Рис. 1.1. Степень влияния на сеть оптимизационных мероприятий.

Рис. 1.2. Трудозатраты при проведении оптимизационных мероприятий.

Рис. 1.3. Суточная цикличность нагрузки.

Глава 2

Рис. 2.1. Графическая интерпретация матрицы трафика.

Рис. 2.2. Построение множества W_K .

Рис. 2.3. Диапазон разрешенных частот для секторов сети.

Рис. 2.4. Использование соканальных и соседних частот.

Рис. 2.5. Блок-схема алгоритма назначения частот.

Рис. 2.6. Исключение колец в процедуре выделения ядер.

Рис. 2.7. Блок-схема алгоритма построения «кольца».

Рис. 2.8. Блок-схема модифицированной процедуры выделения ядер.

Рис. 2.9. Блок-схема алгоритма выделения \oplus -ядра минимальной мощности из H_+ .

Глава 3

Рис. 3.1. Город Кострома.

Рис. 3.2. Целевая территория.

Рис. 3.3. Потенциальные места установки БС.

Рис. 3.4. Зона покрытия исходной сети.

Рис. 3.5. Покрытие сети в конце этапа I.

Рис. 3.6. Изменение весов БС в процессе построения определимого множества.

Рис. 3.7. Синтезированная для Костромы оптимальная сеть стандарта GSM.

Рис. 3.8. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС.

Рис. 3.9. Ядро, включающее 18 БС.

Рис. 3.10. Изменение весов БС в процессе построения определимого множества

- Рис. 3.11. Оптимальное множество, включающее 17 БС.
- Рис. 3.12. Покрытие итоговой сети из 17 БС.
- Рис. 3.13. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС.
- Рис. 3.14. Покрытие исходной сети из 42 БС.
- Рис. 3.15. Совокупность из 16 БС, обеспечивающая исходное покрытие.
- Рис. 3.16. Покрытие, обеспечиваемое совокупностью из 16 БС.
- Рис. 3.17. Совокупность из 9 БС емкостного слоя.
- Рис. 3.18. Покрытие, обеспечиваемое 9-ю БС емкостного слоя.
- Рис. 3.19. БС итоговой двухуровневой иерархической сети.
- Рис. 3.20. Фрагмент сети, где выявлена группа секторов с блокировками.
- Рис. 3.21. Зона поиска площадок-кандидатов.
- Рис. 3.22. Площадки-кандидаты для установки БС.
- Рис. 3.23. Фрагмент сети в итоговой конфигурации.
- Рис. 3.24. Исходная «избыточная» сеть из 42 БС.
- Рис. 3.25. Определимое множество, включающее 18 БС.
- Рис. 3.26. Оптимальное множество, включающее 16 БС.

Глава 4

- Рис. 4.1. Сеть связи как система управления.
- Рис. 4.2. Управляющий орган.
- Рис. 4.3. Общая схема организации оптимизационного процесса.
- Рис. 4.4. Проект сети на этапе развертывания.
- Рис. 4.5. Проект сети с двумя дополнительными БС.

Приложение

- Рис. 1. Реальные и виртуальные источники сигнала
- Рис. 2. Зоны действия реального и виртуального источников сигнала
- Рис. 3. Общая идея процесса калибровки
- Рис. 4. Рассматриваемая территория и маршруты полевого тестирования
- Рис. 5. Расчет уровней сигналов для рассматриваемой территории по модели с исходными параметрами

Рис. 6. Расчет уровней сигналов для рассматриваемой территории по откалиброванной модели

ЛИТЕРАТУРА

Введение

1. Тихвинский В.О. Сети подвижной связи третьего поколения. Экономические и технические аспекты развития в России. – М.: Радио и связь, 2004 г.

Глава 1

1. MN1790 BSS Radio Network Planning and Optimization. Techcom Consulting, 2002.
2. GSM Cell Planning Principles. EN/LZT 123 3314. Ericsson, 2000.
3. PLMN 3G Radio Planning Specialist [RU10]. Nokia Siemens Networks, 2009.
4. Radio transmission and reception // ETSI EN 300 910 V8.5.1 (2000-11). GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999.
5. Материалы веб-сайта: <http://onega.dem.ru>.
6. Материалы веб-сайта: <http://www.ericsson.com>.
7. Материалы веб-сайта: <http://www.nokiasiemensnetworks.com>.
8. Материалы веб-сайта: <http://www.loniir.ru>.
9. Материалы веб-сайта: <http://www.schema.com>.
10. Материалы веб-сайта: <http://www.sotovik.ru>.
11. Материалы веб-сайта: <http://www.forsk.com>.
12. Материалы веб-сайта: <http://azymuth.ru>.
13. Муллат И. Э. Экстремальные подсистемы монотонных систем. Часть 1, 2 // Автоматика и телемеханика. – 1976, №5, №8.
14. Гуляев А. В., Шорин О. А. Синтез оптимальной сети радиодоступа WCDMA при известной модели нагрузки. «Электросвязь». – 2002, №9.

Глава 2

1. Гуляев А. В., Шорин О. А. Синтез оптимальной сети радиодоступа WCDMA при известной модели нагрузки. «Электросвязь». – 2002, №9.
2. Муллат И. Э. Экстремальные подсистемы монотонных систем. Часть 1, 2// Автоматика и телемеханика. – 1976, №5, №8.

3. Шорин О. А., Николаев В.Т., Пантикян Р.Т. Метод частотно-территориального планирования систем подвижной радиосвязи // Радиотехника. -1991, №3.
4. Шорин О. А. Метод частотно-территориального планирования систем подвижной радиосвязи. «Электросвязь». – 1993, №10.

Глава 3

1. Рекомендация МСЭ-RM.1801-1 (04/2010) «Стандарты радиointерфейса для систем широкополосного беспроводного доступа подвижной службы, включая мобильные и кочевые применения, действующих на частотах ниже 6 ГГц».
2. Шорин О. А., Малиничев Д. М., Резинин Д. А. Особенности нового стандарта связи McWiLL (NG-1). «Динамика сложных систем». – 2012, №3.

Дополнительно

1. ASSET User Reference Guide Software Version 6.0. Reference guide Edition 3. – AIRCOM International, 2007.
2. GSM Forté General Product Description - Schema Ltd. 2004
3. S. Ghorashi, E. Homayounvala, F. Said, A Aghvami. “Dynamic Simulator for Studying WCDMA Based Hierarchical Cell Structures”. Proceedings of IEEE Vehicular Technologies Conference, 2002 (VTC’02).
4. S. Hamalainen, H. Lilja, J. Lokio, “Performance of a CDMA Based Hierarchical Cell Structure Network”, Proceedings of PIMRC’97. Helsinki, Finland, September 1997, pp. 863 – 866.
5. А. Гуляев. Эволюция методического подхода к проектированию подсистемы радиодоступа при переходе от сетей 2G к 3G. «Мобильные системы», №7, 2002.
6. Бабин А. И., Шорин О. А. Алгоритм прогноза числа абонентов в сотовых системах связи третьего поколения// «Фундаментальные исследования» № 12, 2007 г.

7. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика. Издательство Российского университета дружбы народов. Москва, 2004 г. – 192 стр.
8. Башарин Г. П., Серебренникова Н. В. Вычисление ВВХ в сотовых сетях связи с учетом мобильности абонентов.// Вестник РУДН, серия «Прикладная и компьютерная математика», 2005 г., №1.
9. Башарин Г.П., Меркулов В.Е. Анализ пропускной способности в иерархических сетях сотовой связи // «Электросвязь», 2003, № 4, с. 45 – 47.
10. Волков А. Н., Рыжков А. Е., Сиверс М. А. UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения. – СПб.: Издательство «Линк», 2008 г. с. – 224.
11. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. Учебное пособие. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
12. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. - М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 400 с.
13. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. Отпечатано в Международном центре научной и технической информации. М., 1996. – 240 с.
14. Гуляев А.В., Шорин О.А. Новые технические требования к проектированию подсистемы радиодоступа сетей 3G по сравнению с сетями 2G. Труды конференции «Мобильная связь XXI века: 2G/2,5G/3G», апрель 2002, Кипр.
15. Кондратов А. Г., Степанов Б. Л. Особенности расчета пропускной способности сотовых сетей подвижной связи// «Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт» № 3, 2009 г.
16. Косинов М. И., Шорин О. А. Повышение ёмкости сотовой системы связи при использовании зон перекрытия// «Электросвязь», № 3, 2003 г.
17. Маковеева М. М., Шинаков Ю. С. Системы связи с подвижными объектами. – М.: «Радио и связь», 2002 г. 440 с.

18. Невдяев Л. М. Мобильная связь 3-го поколения. – М. Серия изданий «Связь и бизнес», 2000. – 208 с.
19. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM («Инженерная энциклопедия ТЭК»). – М., Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
20. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. литературы, 1979.- 496 с.
21. Пышкин И.М., Дежурный И.И., Талызин В.Н., Чвилев Г.Д.; под редакцией Пышкина И.М. Системы подвижной радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1986. – 328 с.
22. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Под ред. Зимина Д.Б. – М.: Радио и связь, 2000.
23. Саати Т. П. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993 г. 278 с.
24. Стручков А.А., Шорин О.А. “Оптимизация радиосети WCDMA”// тезисы доклада на международном форуме информатизации МФИ–2007; труды конференции “ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ”, ООО ”Инсвязьиздат”, М., 2007 г. С. – 177 – 178.
25. System Description D900/D1800. Network System Concept. A50016-D1111-V10-2-7618. SIEMENS, 2004.
26. Тихвинский В. О., Терентьев С. В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 400 с.
27. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М., МТУСИ 2005 г.
28. Шорин О.А. Вероятность перегрузки сотовых систем связи с учетом подвижности абонентов. // «Электросвязь», 2004, № 5.
29. Шорин О.А. Прогноз перегрузок с учетом подвижности абонентов в сотовых системах связи. // «Мобильные системы», 2005, № 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛА

Модель распространения радиосигнала представляет собой математическую форму описания окружающей действительности с точки зрения распространения радиосигнала в пространстве.

Все модели распространения можно разделить на следующие группы:

1. Эмпирические.
2. Детерминистические.
3. Полуэмпирические.

Эмпирические модели были разработаны для применения в широком диапазоне высот подвеса антенн, позволяют учитывать различного типа клаттеры и многолучевое распространение. Используя эти модели, можно рассчитать потери на распространение. Примером такой модели является модель Окамура-Хата.

Детерминистические модели строятся на некотором упрощенном решении более общих задач. Это может быть математической аппроксимацией исходной задачи (модель, основанная на методе конечных разностей) или упрощенной моделью какой-либо специфической ситуации более общей задачи (модель расчета дифракции на клиновидном препятствии). Подобные модели дают высокую точность расчетов, но при этом являются очень сложными и громоздкими.

Полуэмпирические модели представляют собой комбинацию эмпирических моделей с детерминистическими моделями для определенных ситуаций, например модель Окамура-Хата с моделью расчета дифракции на клиновидном препятствии.

Чем выше точность математической модели, тем выше точность получаемых расчетов. В этом смысле для получения достоверных результатов расчета уровня сигнала в пространстве большинство существующих моделей

распространения требуют определенной настройки. Наиболее результативным вариантом является настройка модели по данным полевых измерений.

С помощью данных полевых измерений можно получить более точную модель распространения применительно к данной конкретной местности и учесть ее основные особенности. Этот процесс называется калибровкой модели.

Вместе с тем, нельзя не отметить, что ни одна модель, даже будучи откалиброванной, не позволяет получить одинаковую точность для различных территорий. Именно поэтому калибровка модели под конкретные условия является гораздо более важной процедурой, нежели выбор самой модели, и требует участия специалиста. При этом достоверность модели, получаемой при калибровке, всецело определяется достоверностью используемых для этого данных полевых измерений.

Существует два основных, противоположных по своей сути, подхода к использованию моделей распространения:

- Использовать большое количество моделей, каждая из которых описывает конкретную территорию. Преимущество такого подхода в том, что с его помощью можно добиться очень высокой точности моделирования. Недостатком является тот факт, что такой подход может оказаться невыполнимым или очень дорогим.
- Использовать одну обобщенную модель для всех территорий. Это позволяет значительно упростить процесс выбора модели. Кроме того, сам процесс калибровки становится более экономичным как с точки зрения финансовых затрат, так и с точки зрения времени. К недостаткам можно отнести качество получаемых результатов, поскольку при таком подходе точность существенно ограничена.

Наиболее реалистичным может быть вариант использования небольшого количества типовых моделей, например модели для города, пригорода, сельской местности и т.д. Количество моделей будет определяться:

1. Разнородностью территории, подлежащей моделированию;

2. Имеющимися ресурсами: временем, финансовыми средствами, квалификацией и количеством персонала;
3. Качеством имеющихся цифровых карт: разрешением, набором кластеров, объемами растровой и векторной информации о застройке;
4. Требуемой точностью результата.

Точность модели распространения является очень важным фактором и оказывает влияние на такие процедуры, как:

- **определение сектора, обслуживающего некоторую территорию** – чем выше точность модели, тем более достоверные данные получаются в каждой точке;
- **определение территории обслуживания сектора** – от точности этой процедуры зависит точность распределения нагрузки по территории. Это особенно актуально для территорий с низкой плотностью размещения базовых станций, когда территория обслуживания ограничивается порогом минимального уровня доступа;
- **анализ соседских отношений** – для неплотных сетей или их фрагментов точность модели оказывает существенное влияние на точность определения соседских отношений;
- **создание матрицы интерференции** – именно на эту процедуру точность модели оказывает наибольшее влияние. Например, если модель распространения характеризуется среднеквадратическим отклонением в 8 дБ, то при расчете значения сигнал/помеха в точке среднеквадратическое отклонение составит 11.3 дБ. Для некалиброванных моделей точность будет еще меньше.

Стандартная модель макросоты

Стандартная модель макросоты позволяет учесть различные аспекты распространения радиосигнала. Предназначена, в первую очередь, для моделирования сети с расстоянием между сайтами более 500 метров. Высота расположения антенн может находиться в диапазоне 15-200 метров. Минимального разрешения нет, но рекомендуется использовать карты с

разрешением от 20 до 200 метров. При калибровке типичное значение среднеквадратичного отклонения для этой модели составляет менее 7 дБ.

Формула расчета потерь на распространение

В общем виде формула расчета потерь на распространение для стандартной модели макросоты выглядит так:

$$L_P = k_1 + k_2 \log(d) + k_3(H_{MS}) + k_4 \log(H_{MS}) + k_5 \log(H_{Eff}) + k_6 \log(H_{Eff}) \log(d) + k_7(diff) + C ,$$

где

L_P – потери на распространение;

d – расстояние между базовой и мобильной станцией (км);

H_{MS} – высота расположения мобильной станции над землей (м);

H_{eff} – эффективная высота размещения антенн базовой станции (м);

$diff$ – дифракционные потери;

k_1, k_2 – поправочные коэффициенты, описывающие потери между базовой и мобильной станциями (дБ);

k_3 – поправочный коэффициент для учета эффективной высоты размещения антенны мобильной станции;

k_4 – поправочный коэффициент для H_{MS} ;

k_5 – поправочный коэффициент для учета эффекта усиления сигнала в зависимости от эффективной высоты размещения антенн;

k_6 – поправочный коэффициент для $\log(H_{Eff}) \log(d)$;

k_7 – поправочный коэффициент для расчета дифракционных потерь;

C – поправочный коэффициент, характеризующий клаттер.

Настройка модели распространения производится с помощью коэффициентов $k_1 - k_7$. Результат расчета потерь на распространение измеряется в дБ.

Расчет уровня сигнала

Для стандартной модели макросоты при вычислении уровня сигнала используется формула:

$$P_{RX} = EiRP_{TX} - L_{Mask}(\theta, \varphi) - L_P,$$

где

P_{RX} – мощность принимаемого сигнала (дБм);

$EiRP_{TX}$ – максимальная эффективная изотропно-излучаемая мощность антенны (дБм);

$L_{Mask}(\theta, \varphi)$ – значение потерь антенны для заданного азимута и угла наклона в направлении точки, для которой производится расчет (дБ);

L_P – потери на распространение (дБ).

Вычисление максимальной эффективной изотропно-излучаемой мощности ($EiRP_{TX}$)

Максимальная эффективная изотропно-излучаемая мощность антенны вычисляется по формуле:

$$EiRP = P - L_{Equip} - L_{Feeder} + G_{Ant} + K_{Ant},$$

где

P – мощность на выходе передатчика;

L_{Equip} – потери в оборудовании;

L_{Feeder} – потери в антенно-фидерном тракте,

($L_{Feeder} = \text{Длина фидера} * \text{Потери в фидере}/1\text{м} + \text{Потери в джамперах}$);

G_{Ant} – коэффициент усиления антенны;

K_{Ant} – корректирующий коэффициент для антенны.

Стандартная модель микросоты

Стандартная модель микросоты основывается на так называемой технике трассировки луча. При этом для описания среды распространения радиосигнала учитываются контуры зданий и топографические особенности местности.

Территория, для которой производится расчет уровня сигнала, делится на пиксели. Уровень сигнала вычисляется в центре каждого пикселя. Модель позволяет рассчитывать уровень сигнала с очень высоким разрешением - менее метра. Итоговая точность ограничивается разрешением массива топологических данных.

Распространение сигнала рассматривается в горизонтальном направлении, исходя из предположения, что доминирующим способом распространения радиоволн является «каньонный» способ, т.е. вдоль зданий. Кроме того, каждая часть пути распространения сигнала вносит дополнительные потери – потери на клаттере. Этот факт используется для корректировки формулы расчета уровня сигнала для территорий с большими открытыми пространствами (площади, парки и т.д.), где «каньонный эффект» отсутствует.

При расчете потерь на распространение учитываются прямое распространение волны на пути от источника сигнала до его приемника, а также дифракция. Отражение волны от стен домов в данной модели не учитываются.

Для моделирования процесса распространения волны между двумя точками используется комбинация реальных и виртуальных источников сигнала. Реальные источники – это физические базовые станции. Виртуальные источники используются для моделирования дифракции на вертикальных кромках зданий.

В зависимости от нахождения точки расчета могут использоваться два типа моделей расчета потерь на распространение:

- модель прямой видимости от источника сигнала;
- модель вне прямой видимости (дифрагированная волна).

Расчет уровня сигнала для точки в прямой видимости

Расчет уровня сигнала для точек, находящихся в прямой видимости от источника сигнала, производится согласно формуле:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{Street} + G_{AntHeight} + G_{Mask},$$

где

P_{RX} – мощность принимаемого сигнала (дБм);

P_{TX} - излучаемая мощность ($EiRP$) (дБм);

G_{Street} - потери на распространение;

$G_{AntHeight}$ – дополнительное усиление за счет подъема антенны;

G_{Mask} – значение потерь антенны в направлении точки, для которой производится расчет (дБ).

Расчет потерь на распространение для модели прямой видимости

Для расчета потерь на распространение в условиях прямой видимости используется формула:

$$G_{Street}(d) = -I_{1m} - f(x) = \begin{cases} s_1 \log_{10}(d), & d < d_{break} \\ s_2 \log_{10}(d) + (s_1 - s_2) \log_{10}(d_{break}), & d \geq d_{break} \end{cases}$$

где

d – расстояние от источника сигнала до мобильной станции (м);

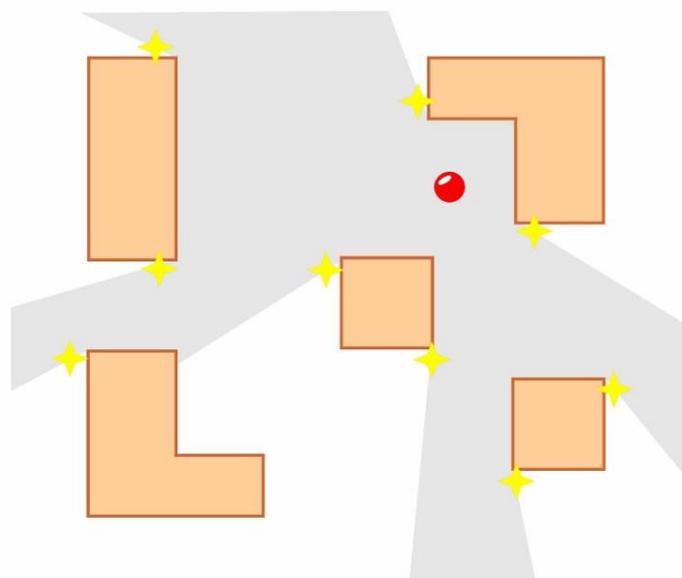
I_{1m} – потери на распространение на расстоянии 1 м от антенны (дБ);

s_1 – угловой коэффициент перед точкой излома (дБ/декаду);

s_2 – угловой коэффициент после точки излома (дБ/декаду);

d_{break} – расстояние до точки излома (м).

На рис. 1. показан пример реальных и виртуальных источников сигнала при моделировании ситуации прямой видимости:



- Здание
- Зона прямой видимости
- Реальный источник сигнала
- Виртуальный источник сигнала

Рис. 1. Реальные и виртуальные источники сигнала

Расстояние до точки излома

Расстояние до точки излома при расчете потерь на распространение – это расстояние, на котором первая зона Френеля достигает земли. Вычисляется по формуле:

$$d_{break} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2) - \frac{\lambda^2}{2} (\Sigma^2 + \Delta^2) + \frac{\lambda^4}{16}},$$

где

λ – длина волны (м);

Σ – высота размещения антенн BS + высота размещения MS (м);

Δ – высота размещения антенн BS - высота размещения MS (м).

Дополнительное усиление за счет высоты размещения антенн

Применяется ко всем точкам в зоне прямой видимости. Вычисляется по формуле:

$$G_{AntHeight} = K_{AntHeight} \log_{10}(h_{TX}),$$

где

$K_{AntHeight}$ – поправочный коэффициент усиления за счет высоты подъема антенн;

h_{TX} - высота размещения антенн БС (м).

Потери антенны в направлении точки, для которой производится расчет

Эта величина используется при расчете уровня сигнала для точек в зоне прямой видимости. Применяется ко всем точкам.

Расчет уровня сигнала для точек вне зоны прямой видимости

Для расчета уровня сигнала в точках, находящихся вне зоны прямой видимости, используется модифицированное уравнение расчета уровня сигнала для точек зоны прямой видимости. Модификация состоит в применении концепции виртуальных источников излучения для точек, находящихся вне зоны прямой видимости, с помощью которых моделируется дифракция сигнала на краях зданий или каких-либо препятствиях.

Согласно этой методике, на прямой, проходящей через реальный источник излучения (базовую станцию) и кромку здания, позади кромки здания размещается виртуальный источник сигнала. Излучают реальный и виртуальный источники по-разному. Реальный источник излучает сигнал во все стороны, виртуальный – только в полуплоскости, затеняемой кромкой здания, на которой происходит дифракция. Расположение источников сигнала и зоны и зоны их действия представлены на рис. 2.

Если вокруг рассматриваемой точки расположено несколько виртуальных источников, то для каждого из них в этой точке вычисляется уровень сигнала и затем выбирается сильнейший.

Очевидно, что виртуальные источники не имеют антенн, поэтому параметр $G_{AntHeight}$ в ситуации отсутствия прямой видимости для таких источников не вычисляется.

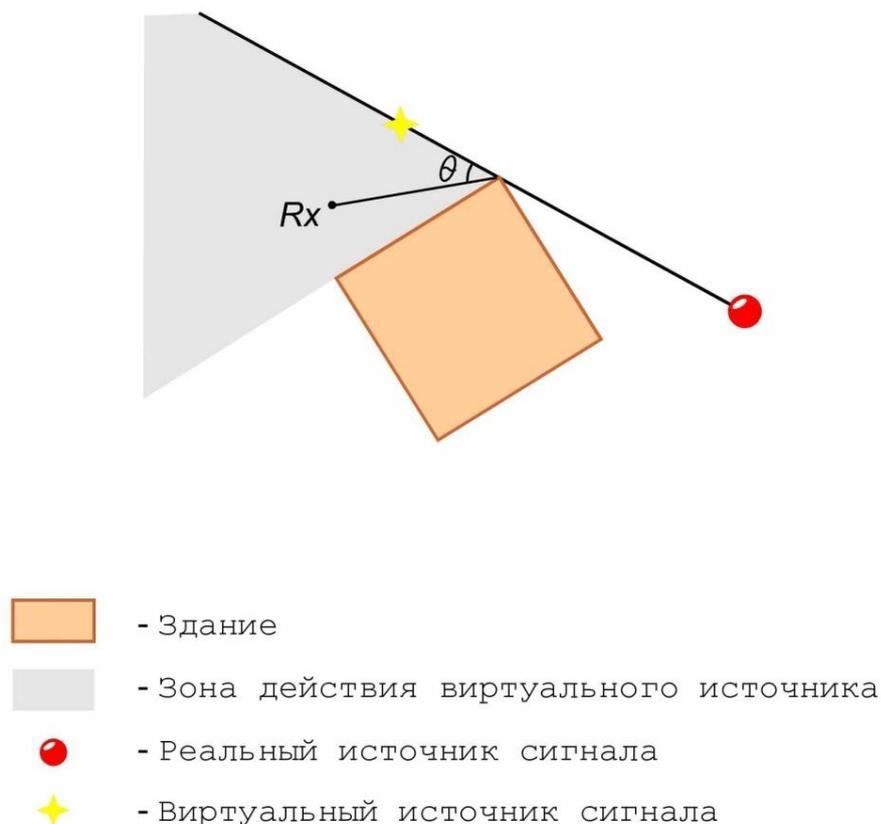


Рис. 2. Зоны действия реального и виртуального источников сигнала

Расчет потерь на распространение вне зоны прямой видимости

Потери на распространение $G_{Street}(d)$ учитываются при расчете уровня сигнала вне зоны прямой видимости также, как и в ситуации прямой видимости, но с некоторыми модификациями:

I_{1m} – мощность сигнала виртуального источника, вычисленный по модели реального источника;

s_1 и s_2 – характеризуются углом дифракции Θ следующим образом:

$$s_1(\Theta) = \frac{s_1^{max} + s_1^{min}}{2} + \frac{s_1^{min} - s_1^{max}}{2} \cos\Theta,$$

$$s_2(\Theta) = \frac{s_2^{max} + s_2^{min}}{2} + \frac{s_2^{min} - s_2^{max}}{2} \cos\Theta$$

и принимают минимальное и максимальное значения при углах Θ , равных 0 и 180 градусов соответственно:

$$s_1(0) = s_1^{min}, s_2(0) = s_2^{min}, s_1(180) = s_1^{max}, s_2(180) = s_2^{max}.$$

Потери на клаттере в модели микросоты

При использовании модели микросоты для повышения точности результатов в дополнение к потерям на распространение необходимо учитывать потери на клаттере. Это можно сделать с помощью дополнительного отрицательного коэффициента, вычисляемого таким образом:

$$G_{Clutter} = - \sum_{Clutter\ types} s_i d_i,$$

где

s_i – дополнительный угловой коэффициент (>0) для клаттера определенного типа (дБ/м);

d_i – протяженность пути распространения сигнала по клаттеру (м).

Рекомендуемые параметры для стандартной модели макросоты

В таблице 1 приведены рекомендуемые значения параметров настройки модели макросоты, которые можно использовать по умолчанию. Они описывают усредненную типизированную модель городской застройки, а поэтому подходят не для всех возможных ситуаций. Несоответствие параметров модели реальной обстановке сказывается на точности расчетов и, как следствие, на достоверности

результатов. Для реальных проектов необходима калибровка значений параметров потерь на распространение в соответствии с реальной действительностью.

Таблица 1

Параметр	900 МГц	1800 МГц
H_{MS}	1,5	1,5
$k1$	150,6	160,9
$k2$	44,9	44,9
$k3$	-2,55	-2,55
$k4$	0	0
$k5$	-13,82	-13,82
$k6$	-6,5	-6,55
$k7$	0,7	0,8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

После создания модели распространения сигнала очень важно ее тщательно настроить в соответствии с особенностями местности, для которой эта модель предназначена. Для этого нужно сравнить данные расчетов уровней сигналов, полученных с помощью модели, с данными полевых измерений, проведенных для рассматриваемой местности.

При этом совершенно очевидно, что достоверность получаемой модели будет в большой степени зависеть от того, как собраны данные полевых измерений. Для построения корректной модели рекомендуется:

- производить измерения типичных сайтов, учитывая такие особенности, как топология окрестной местности и высота размещения антенн на сайте;
- использовать GPS, особенно при калибровке микросот, чтобы обеспечить надлежащую точность;

- собрать достаточное количество данных, т.к. это влияет на точность калибровки модели;
- на каждый тип клаттера должно приходиться достаточное количество измерений. Как правило, это минимум 10% от всех измерений или не менее 300 точек на карте;
- полезной информацией являются панорамные фотографии с сайтов, для которых производится сбор полевых измерений.

Вычисление и анализ коэффициента корреляции

Для оценки точности соответствия расчетных данных и данных полевого тестирования применяется коэффициент корреляции, вычисляемый по формуле Пирсона:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

где

x_i - измеренное i -ое значение;

y_i - рассчитанное i -ое значение;

\bar{x} – среднее для измеренных значений;

\bar{y} - среднее для рассчитанных значений.

Значение r лежит в диапазоне от -1 (отрицательная корреляция) до 1 (положительная корреляция). В рассматриваемом случае требуется положительная корреляция. Значение r , равное 0, будет свидетельствовать о том, что данные совершенно некоррелированы.

Исследование с помощью среднеквадратического отклонения

Для анализа радиосигналов применяется несмещенная оценка среднеквадратического отклонения:

$$s^* = s \sqrt{\frac{N}{N-1}}$$

Т.е. в случае, если имеется 11 измерений, то несмещенная оценка среднеквадратического отклонения будет в $\sqrt{\frac{11}{10}} = 1,0488$ раз больше нормального среднеквадратического отклонения.

Нормальное среднеквадратическое отклонение будет смещенным в том случае, когда имеется малое количество измерений. В частности, если есть только одно измерение, то среднеквадратическое отклонение будет равно 0. Но это не будет означать абсолютной точности.

Использование несмещенной оценки в таком случае позволяет компенсировать ситуацию. Причем, чем больше количество измерений, тем меньше становится разница между измерениями.

Настройка (калибровка) модели

Стандартная модель макросоты получена эмпирическим путем. Чтобы получить точные данные потерь на распространение, необходимо произвести калибровку параметров модели с помощью данных полевых измерений. Этот процесс очень трудозатратный и требует высокой квалификации, поскольку представляет собой многопараметрическую оптимизацию. Причем, может оказаться, что сделать это вручную невозможно.

Ввиду сложности процедуры калибровки трудно дать полное ее описание. Общая идея процесса калибровки представлена на рис. 3. Описать же процесс можно следующим образом:

1. Производить калибровку модели, используя данные полевых измерений.
2. Предварительно провести фильтрацию данных измерений, например, выбрать данные только для точек, находящихся в пределах прямой видимости.
3. На основе анализа данных измерений изменить параметр в модели распространения.
4. Используя средства визуального контроля, например, карту с нанесенными данными полевых измерений и расчетных значений, оценить эффект от внесенного в модель изменения параметра.

5. Если изменение привело к улучшению модели, т.е. к снижению среднеквадратического отклонения между расчетными и измеренными данными, то сохранить их и продолжить настройку оставшихся параметров модели.

Пошаговая процедура настройки стандартной модели макросоты

1. Проверить данные полевых измерений, приготовленные для калибровки модели, на предмет каких-либо явных ошибок.
2. Убедиться, что данные полевых измерений имеются для всех типов клаттеров.
3. Изучить фотографии, сделанные на сайте, чтобы убедиться, что имеющиеся данные полевых измерений соответствуют рассматриваемой местности.
4. В качестве начального набора ввести рекомендованные для модели параметры.
5. Загрузить один или несколько файлов полевых измерений и, отфильтровав подозрительные данные (например, измерения с уровнем сигнала ниже порога чувствительности или измерения для тех клаттеров, для которых их количество мало), получить объективный набор данных.
6. Проанализировав график зависимости уровня сигнала от дальности, получить приближенное значение параметра k_2 .
7. Подобрать значение параметра k_1 так, чтобы среднее отклонение уменьшилось до 0. Если среднее отклонение станет отрицательным, это будет означать, что модель более пессимистична по сравнению с данными измерений. В этом случае необходимо уменьшить значение параметра k_1 . В противном случае необходимо поступить наоборот.

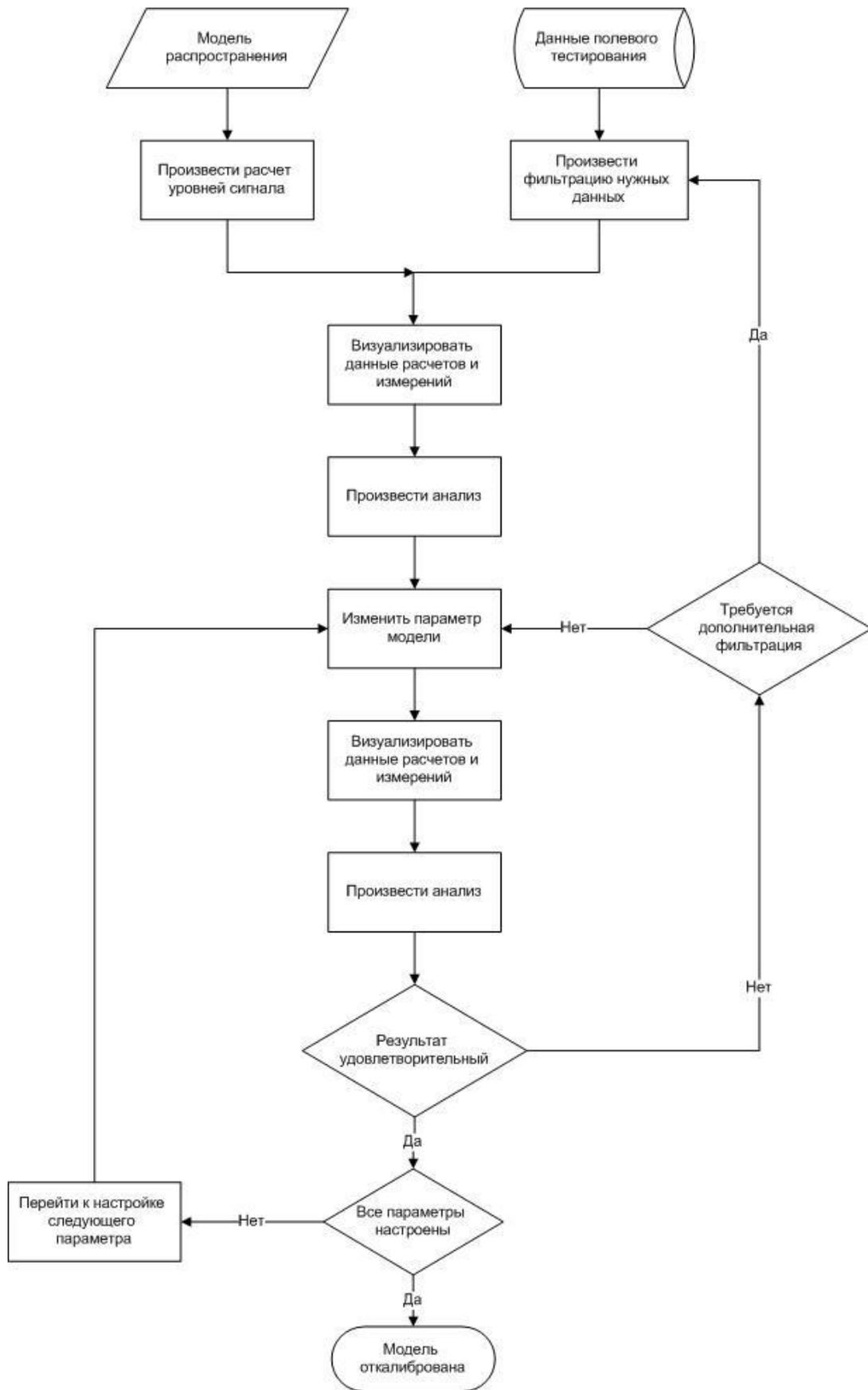


Рис. 3. Общая идея процесса калибровки

8. Параметр $k7$ появляется только тогда, когда отсутствует условие прямой видимости между базовой станцией и мобильным телефоном. Чтобы определить параметр $k7$, необходимо отфильтровать данные полевых измерений так, чтобы выборка содержала данные только для ситуаций вне прямой видимости. Если среднее отклонение будет меньше нуля, значение параметра $k7$ необходимо уменьшить, в противном случае – увеличить.
9. Вернуть фильтр в исходное состояние, т.е. включить обратно в рассмотрение данные прямой видимости.
10. Если полученное среднее отклонение после изменения параметра $k7$ выросло или уменьшилось, подстроить параметр $k1$.
11. Подстроить параметр $k6$.
12. Подстроить значение параметра $k1$, если среднее отклонение изменилось после изменения параметра $k7$.
13. Настроить компенсирующий параметр для каждого клаттера так, чтобы для каждого из них среднее отклонение стало равно нулю.
14. Варьировать значения параметров $k3$, $k4$ и $k5$ до тех пор, пока среднее отклонение не станет минимальным.

Теперь модель откалибрована и готова к дальнейшему использованию.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАЛИБРОВАННОЙ И НЕКАЛИБРОВАННОЙ МОДЕЛЕЙ

Пусть необходимо откалибровать модель распространения сигнала для некоторой территории (рис. 4). На ней расположено 6 базовых станций, работающих в диапазоне GSM900. Для этой территории проведен ряд полевых измерений, маршрут которых изображен на рис. 4. Данные полевых измерений обработаны в соответствии с описанной выше методикой.

Использование стандартной модели макросоты с исходными параметрами настройки дает картину, показанную на рис. 5.

После проведения калибровки с использованием данных полевых измерений были получены новые параметры для используемой модели распространения сигнала. Они показаны в таблице 2.

Расчет уровней сигналов, проведенный по откалиброванной модели, дает результат, представленный на рис. 6.

Сравнительный анализ, проведенный на основе среднеквадратического отклонения, показал следующее:

- стандартная модель макросоты с исходными параметрами, применительно к рассматриваемой территории, дает среднеквадратическое отклонение в 11,2 дБ;
- после проведения калибровки модели макросоты по данным полевого тестирования удалось добиться значения среднеквадратичного отклонения в 7,3 дБ.

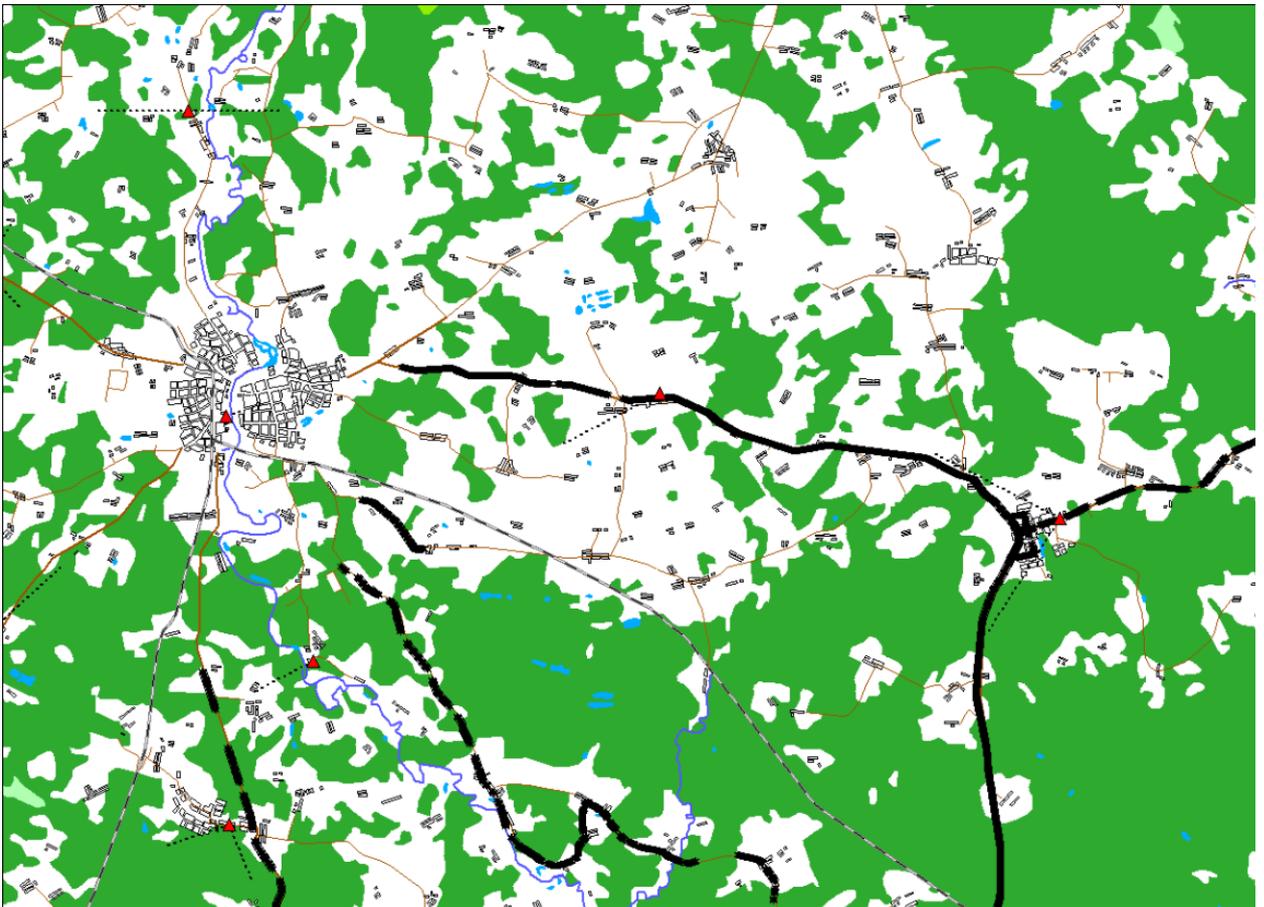


Рис. 4. Рассматриваемая территория и маршруты полевого тестирования

Таким образом, откалиброванная модель позволяет получить более реалистичную картину распространения радиосигнала, что положительным образом сказывается на всех последующих этапах использования данных расчетов по модели.

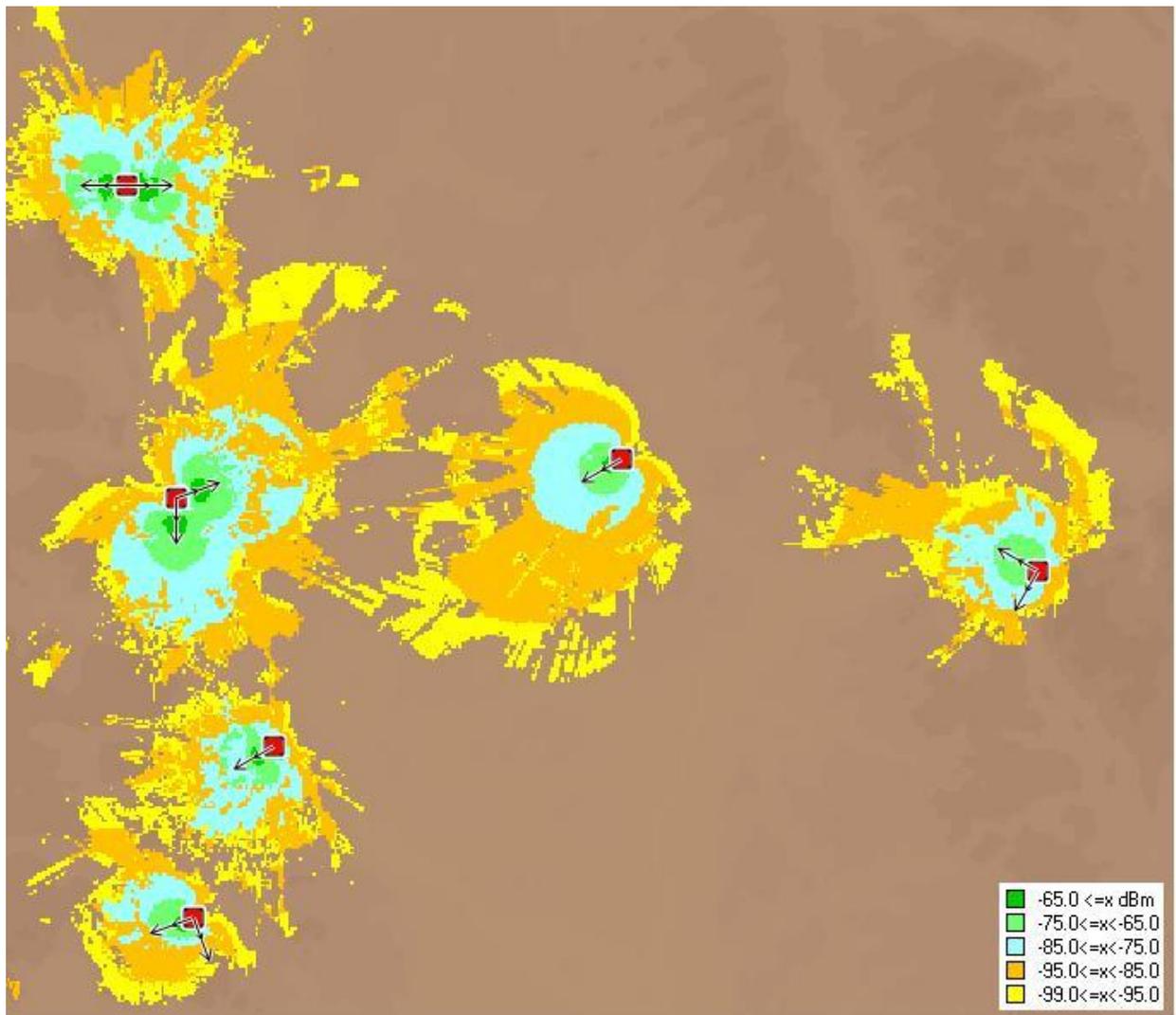


Рис. 5. Расчет уровней сигналов для рассматриваемой территории по модели с исходными параметрами

Таблица 2

Параметр	Рекомендуемые значения	Значения после калибровки
k_1	150,6	229,77
k_2	44,9	63,69
k_3	-2,55	-2,55
k_4	0	0
k_5	-13,82	-77,53
k_6	-6,5	-11,39
k_7	0,7	1,98

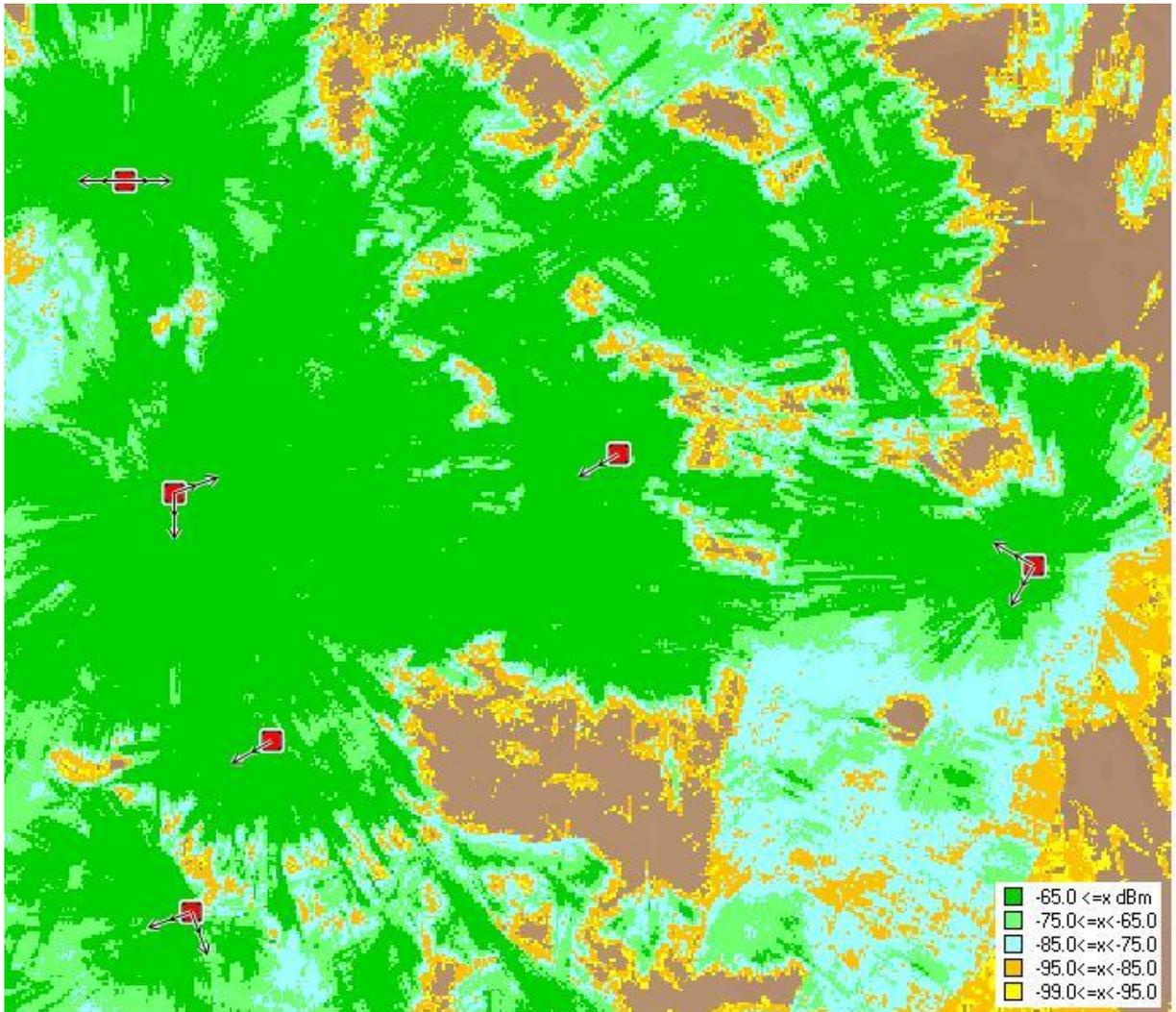


Рис. 6. Расчет уровней сигналов для рассматриваемой территории по откалиброванной модели