

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Павловская Ксения Александровна

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ 5G НА ОСНОВЕ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (по отраслям) (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Яремко Игорь Николаевич,
доцент кафедры «Автоматика и
телекоммуникации» ГОУВПО «ДОННТУ»

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится « » г. в часов на заседании диссертационного совета
Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДонНУ» по адресу: 283001,
г. Донецк, ул. Артема, 58, корп.1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail:
uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ»
по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета:
<http://donntu.org>

Автореферат разослан «_» 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Концепция технологии сотовой связи 5G предполагает предоставление телекоммуникационных услуг разного типа. К ним относятся как голосовые услуги, так и приложения типа машина–машина M2M на скоростях передачи данных до 10 Гбит/с. Реализация такой концепции возможна за счет внедрения следующих технологических решений:

- применение массивных MIMO (Multiple Input Multiple Output),
- осуществление логического сегментирования сети (Networkslicing),
- переход на новые диапазоны свыше 3,5 ГГц.

Вышеперечисленное вызвало определенные трудности для планирования и оптимизации мест расположений базовых станций. Основным критерием для принятия решений является обеспечение требуемых параметров качества обслуживания QoS (Quality of Service). Анализ существующих методов планирования и оптимизации мест расположения базовых станций показал, что они не позволяют полностью реализовать потенциал, заложенный в концепцию технологии сотовой связи 5G. А именно, математические модели, описывающие основные параметры территориального планирования учитывают до двух критериев для принятия решения, при этом выбор самих критериев зависит только от субъективного мнения разработчика.

Таким образом, повышение качества связи вследствие определения точного расположения базовых станций систем сотовой связи 5G на основе многокритериальной оптимизации, за счет разработки метода территориального планирования, является актуальной задачей, имеющей большое значение для операторов сотовой связи.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам планирования и оптимизации мест расположений базовых станций систем сотовой связи посвящено большое количество научных работ: как отечественных ученых Бойко М.П., Тихвинского В.О., Теренетьева С.В., Вишневого В.М., Портного С.Л., Шахновича И.В., так и зарубежных Murphy S., Amaldi E., Capone A., Siomina I., Yuan D., Beasley J., Okumura Y. Предметом рассмотрения в данных работах является методы планирования, основанные на использовании эмпирических моделей процесса распространения радиоволн для оценки дальности связи. К недостаткам этих моделей можно отнести погрешности, вносимые за счет игнорирования определенных факторов окружающей среды (атмосферные газы, климатические явления), которые существенно влияют на работу мобильных устройств в диапазонах, используемых как для LTE (Long Term Evolution), так и для 5G.

В отечественной литературе планированию сетей сотовой связи 5G посвящены работы по выбору их оптимальной архитектуры с учетом показателей качества обслуживания. Детальный анализ показал, что они не учитывают неоднородность и интеграцию различных технологических решений сетей сотовой связи 5G. Таким образом, методы однокритериальной оптимизации являются некорректными в этом случае.

На основании вышеприведенного можно сказать, что в результате использования существующих методов для планирования сетей сотовой связи 5G могут возникнуть дополнительные, не учтенные обрывы связи, приводящие к потерям абонентского состава.

Цель и задачи исследований. Целью работы является повышение эффективности работы сотовых сетей связи 5G путем обоснования метода территориального планирования с использованием комплексного многокритериального анализа, позволяющего определить точное месторасположение базовых станций.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих моделей и методов территориального планирования систем сотовой связи.
2. Разработать критерии оценки эффективности решения оптимизационной задачи для целей планирования мест расположений базовых станций сотовых сетей 5G.
3. Разработать метод определения мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G с оптимальными показателями качества QoS.
4. Оценить эффективность и разработать рекомендации по практическому использованию предложенных в диссертации решений.

Объект исследования. Объектом исследования является процесс распространения сигнала в сотовых сетях широкополосного доступа.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы и методики территориального планирования сотовых сетей широкополосного доступа.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые обоснованы требования к модифицированной постановке задачи оптимального расположения базовых станций, учитывающей модель распространения сигналов в радиоканале для сетей стандарта 5G.
2. Получил дальнейшее развитие метод многокритериальной оптимизации для сетей сотовой связи.
3. Обоснована модель размещения базовых станций для сетей стандарта 5G на базе генетического подхода.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии особенностей территориального планирования сетей сотовой связи, их использовании для повышения эффективности работы сотовых сетей 5G и обосновании модели размещения базовых станции для сетей стандарта 5G на основе генетического подхода.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»: ГТ №Н-3-11 «Исследование и разработка методов проектирования и повышения технической эффективности цифровых систем управления, информационно-измерительных систем и телекоммуникаций»: ГТ № Н-9-16

«Разработка системы автоматического управления очередью пограничного маршрутизатора в инфокоммуникационных системах».

Практическая значимость работы.

1) Разработаны критерии оценки эффективности решения оптимизационной задачи для целей планирования мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G.

2) Разработан метод определения мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G с оптимальными показателями качества QoS.

3) Предложена программная реализация, обеспечивающая решение задач размещения базовых станций различной размерности, позволяющая определить конфигурацию сети и рассчитать суммарную стоимость построения такой сети, учитывая критерии показателей качества.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными организациями, телекоммуникационными компаниями при проектировании и внедрении сетей стандарта 5G. Практическая реализация результатов работы подтверждается справкой о внедрении в учебный процесс ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 30-12/107 от 09.06.2020 об использовании в учебном процессе при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Общая теория связи», «Системы и сети радиосвязи» по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», справкой о внедрении в ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ОПЕРАТОР СВЯЗИ» (ГП «РОС»).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на положениях общей теории связи, теории распространения сигналов, методы оптимизации и математического моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что введение в целевую функцию дополнительного коэффициента g_{km} , учитывающего потери сигналов в радиоканале между антеннами базовой и абонентских станций, обеспечивает учет большого числа параметров, влияющих на распространение сигналов в радиоканале.

2. Показано, что метод многокритериальной оптимизации для сетей пятого поколения, учитывающий основные показатели качеств (QoS), позволяет рационализировать расстановку базовых станций в сетях 5G.

3. Установлено, что предложенная процедура расположения базовых станций, позволяет визуализировать получаемые результаты и существенно сократить затраты времени на планирование или адаптацию сотовой сети.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания задачи и результатами математического моделирования при решении поставленных

задач в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) в частности: п.1. «Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения», г. Севастополь, 11-15 сентября 2017 г.; II Республиканская с международным участием научно-практическая конференция «Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы», г. Донецк, 31 октября 2019 г.; XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСАУ-2019), г. Таганрог, 05-07 декабря 2019г.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению в государственном предприятии.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 8 научных работах, в том числе: 5 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН ДНР; 3 – по материалам конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 130 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 83 источников на 9 страницах и 1 приложения на 2 страницах. Основной текст, изложенный на 109 страницах, иллюстрируется 32 рисунками и содержит 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе работы «Анализ принципов построения и технические проблемы систем сотовой связи» проведены сравнение и анализ систем сотовой связи существующих стандартов.

Стандарт GSM систем сотовой связи 2G - один из первых стандартов, предоставивший широкий спектр услуг абонентам: голосовые соединения, услуги передачи данных, передача текстовых сообщений и т.д.

Стандарт сетей мобильной связи UMTS 3G предоставил абонентам широкий перечень услуг: видеозвонки, видеоконференции, загрузка файлов с высокой скоростью, сетевые игры и мобильная коммерция.

Дальнейшая модернизация сетей 3G привела к разработке нового стандарта LTE и, работающего на его основе, сети 4G, что увеличило качество мобильной связи. Так скорость передачи данных от базовой станции к мобильному устройству абонента составляет до 100 Мбит/с, скорость от абонента к базовой станции до 50 Мбит/с. Существенные изменения произошли в системах базовых станций и в системах коммутации. Была изменена технология передачи данных между устройствами пользователя и базовой станцией.

С каждым новым поколением увеличивается количество предоставляемых услуг, и, как следствие, требования потребителей телекоммуникационных услуг становятся более жёсткими.

Из-за растущего в геометрической прогрессии количества пользователей сотовой связи и возрастающими требованиями к качеству, было принято решение разрабатывать новый стандарт сетей 5G (пятое поколение).

Сети 5G представляют собой перспективную архитектуру систем беспроводного доступа, основанную на использовании различных малых сот и предназначенную для удовлетворения новых требований по емкости и качеству покрытия сети.

Исходя из сценариев 5G, определены требования к сетям 5G:

- максимальная скорость передачи данных — до 20 Гбит/с;
- сверхнизкая задержка передачи данных (latency) — не более 1 мс;
- мобильность абонента – до 500км/ч;
- поддержка большого количества абонентских устройств — до 1 млн. на 1 кв. км;
- распределение между разными услугами необходимого частотного ресурса;
- обеспечение надежной защиты передаваемых данных;
- низкое энергопотребление;
- бесперебойная работа.

Вследствие анализа эффективности функционирования уже реализованных и широко используемых систем сотовой связи ранних поколений можно выделить недостатки подсистемы базовых станций (БС).

Недостатки базовых станций можно разделить на следующие категории:

- проблемы монтажа и эксплуатации;
- технические проблемы БС;
- экономические проблемы, связанные с эксплуатацией БС.

Для решения этих проблем необходимо проводить разработку новых моделей и методов планирования мест расположения базовых станций и соединений между ними, которые позволят учесть технологические ограничения предыдущих поколений мобильной связи, одновременно с этим используя новые технические возможности 5G.

Сделан вывод о необходимости разработки методов определения оптимальной структуры сети (количество и местоположение базовых станций), учитывающих несколько критериев качества обслуживания абонентского трафика и их стоимостных характеристик.

Во втором разделе «Анализ методов территориального планирования сетей» рассматриваются методы территориального планирования сетей мобильной сотовой связи. Использование методов территориального планирования должно обеспечивать оптимальный выбор:

- зон уверенной работы базовых станций, исходя из требуемого качества связи, с контролем на границах зон;
- зон покрытия базовых станций, в этих зонах уровень сигнала соответствует заданному значению, но вне зоны покрытия уровень сигнала не гарантируется;
- зон покрытия коммутатора, зоны в которых подключение базовых станций к коммутатору происходит без потери качества связи;
- зон взаимных помех, эти зоны определяются по уровню помех, создаваемых станциями при наложении зон покрытий;
- уровня сигнала базовой станции выше уровня помех.

Применение методов территориального планирования решает задачу построения сети, удовлетворяющей исходным требованиям. Необходимо построить такую сеть мобильной связи S'' , которая обладала бы наилучшей, с точки зрения безусловного критерия предпочтения, совокупностью показателя качества, где $\bar{K}(S'')$:

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

Пусть любой или, по крайней мере, один из показателей качества $K_i(S'')$ оптимизированной сети лучше, чем у исходной сети S' .

Выбор решения, при котором сеть обладает наилучшими показателями вектора качества $K(S)$ наиболее верно происходит при рассмотрении нескольких вариантов векторно-сравнимых решений задач векторной многокритериальной оптимизации.

Учитывая все требования, предъявляемые к планированию беспроводных сетей широкополосного доступа, сделан вывод о применении для планирования сетей 5G метода кластерного планирования.

Задачей территориального планирования сети с применением кластерного метода является расстановка на заданной территории минимального количества базовых станций с заданным числом абонентов и условий местности. Для этого

используются различные модели. Известные модели прогноза зон покрытия сетей сотовой связи такие, как Ли, Окамуры, Хата, Уолфиша-Икегами не могут использоваться для планирования сетей сотовой связи 5G, так как они не учитывают потери при распространении сигнала в радиоканале между базовой станцией и абонентской станцией на частотах работы сетей сотовой связи 5G.

В диссертации исходя из принципа многокритериальности, предлагается модифицированная задача, в которой учитываются не только потери распространения сигналов на основе канальной модели SUI, но и стоимостные характеристики модели. Решение задачи в данном случае сводится к вычислению целевой функции стоимости (2) и ее дальнейшей минимизации:

$$\varphi = \sum_k \sum_m \sum_n W_{kmn} X_{mn} Y_{kn} + \sum_m \sum_n c_n X_{mn} + \sum_k \sum_m \frac{1}{g_{km}} Y_{km} \rightarrow \min \quad (2)$$

$$W_{kmn} \begin{cases} W_{kmn}^1 > 0, & \text{если расстояние } r \leq R_1 \\ W_{kmn}^2 > 0, & \text{если расстояние } R_1 < r \leq R_2, \quad \text{усл. ед.} \\ W_{kmn}^3 = 0, & \text{если расстояние } r > R_2 \end{cases}$$

$$X_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{если станция } m - \text{го типа, расположена на } s - \text{ом месте} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$Y_{km} = \begin{cases} 1, & \text{если абонент подключен к станции расположенной на } s \text{ месте} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где W_{kmn} – стоимость подключения k -го абонента к станции n -го типа; g_{km} – коэффициент, учитывающий условия распространения сигнала мобильной связи в канале между k -м клиентом и базовой станцией, размещенной на m -м планируемом месте (место - кандидат); m – число мест кандидатов на расположение базовых станций с известными координатами $m=1, \bar{M}$; n – количество типов станций, $n=1, \bar{N}$; k – число абонентов с заданными координатами $k=1, \bar{K}$; R_1, R_2 – радиус действия базовых станций первого и второго типа.

Для данной функции принята следующая система ограничений:

1. На каждом из предполагаемых мест расположения (место - кандидат) должно быть размещено не более одной базовой станции:

$$\forall m \sum_{n=1}^N X_{mn} \leq 1 \quad (3)$$

2. Каждый абонент должен быть обязательно подключен только к одной базовой станции:

$$\forall k \sum_{m=1}^M Y_{km} = 1 \quad (4)$$

3. Суммарный трафик всех абонентов, подключенных к станции n -го типа и размещенной на m -ом месте, не должен превышать значения производительности станции:

$$\forall m \sum_{n=1}^N b_n X_{mn} \geq \sum_{k=1}^K b_k Y_{km}, \quad (5)$$

где b_n – производительность станции n -го типа, Гбит/с; b_k – требуемая скорость передачи информации для k -го абонента, Гбит/с.

Разработанная канальная модель распространения сигнала позволяет провести планирование сетей сотовой связи пятого поколения путем оптимального расположения базовых станций с учетом потерь, возникающих при передаче сигнала по радиоканалу. Базовые станции располагаются в зависимости от внутриканальных и межканальных помех, а также местности, плотности застройки, наличия насаждений, высот антенн базовых станций и абонентов, погодных условий с учетом экономической обоснованности.

В третьем разделе работы «Разработка метода расположения базовых станций сетей 5G с оптимальными показателями качества QoS методом многокритериальной оптимизации» рассматривается вопрос создания оптимальной сети широкополосной связи, руководствуясь несколькими критериями и нахождения их наилучшего значения, используя различные методы решения задач размещения базовых станций.

Рассмотрим следующую задачу для сети 5G частных оптимальных критериев, характеризующих функциональную надежность сети и оптимизацию ее на их основе. Критерии должны соответствовать следующим требованиям:

- их количество должно быть минимальным и включать в себя наиболее важные частные критерии;
- вектор оптимального решения K (6) должен с достаточной точностью описывать функциональную надежность проектируемой сети.
- частные критерии должны иметь понятное содержание и характеризовать простые свойства сетей 5G.

Для сетей мобильной связи 5G наиболее значимыми критериями, которые в полной мере отображают качество обслуживания (QoS) являются:

- критерий надежность передачи данных (N). Данный критерий характеризуется вероятностью неработоспособности (Q) сети. Критерий в полной мере влияет на состояние всей сети связи. Так при увеличении количества отказов отдельно взятой базовой станции надежность соединения снижается, что влечет за собой снижение надежности всей сети и качества ее работы;
- критерий скорости передачи (V) (пропускная способность). Критерий основного качественного показателя сети характеризуется относительными отклонениями от нормы коэффициентов использования емкости кольца $\Delta\mu_{ring_N}$ и сети $\Delta\mu_{network}$. Одним из примеров проявления данного критерия является неравномерная загрузка сети, при таком режиме работы сети часть базовых станций работает с перегрузкой, другая их часть простаивает, либо недогружена. Данная ситуация снижает надежность работы сети в первом случае и влечет необоснованные финансовые затраты во втором;

- критерий материальных затрат (С). Данный критерий характеризуется коэффициентом использования капитальных затрат $K_{икз}$ на строительство базовых станций (стоимость базовой станции n -го типа и – стоимость подключения k -го абонента к станции n -го типа). Для операторов мобильной связи важным является предоставление качественных и надежных услуг мобильной связи при малых значениях критерия капитальных затрат.

Каждый из выбранных вариантов построения сети мобильной связи M_i можно описать целевой функцией (6) и функцией полезности (7).

$$\min K_i = K(N_i(\bar{x}), V_i(\bar{x}_v)), \quad (6),$$

$$C_i(\bar{x}_N, \bar{x}_v) \leq C_{don} \quad , \quad (7),$$

где K_i – вектор оптимального решения для сети мобильной связи 5G; N_i – частный критерий надежности передачи данных; V_i – частный критерий пропускной способности сети; C_i – частный критерий материальных затрат при создании сети; \bar{X}_n – вектор надежности передачи данных; \bar{X}_v – вектор пропускной способности сети; C_{don} – допустимое значение частного критерия материальных затрат.

На этапе планирования сети сотовой связи 5G и на этапе дальнейшей эксплуатации векторы надежности передачи данных имеют следующий вид:

$$\bar{x}_N = \left\{ \begin{matrix} \rho_{ab}, \\ P_k, \\ \varphi_k \end{matrix} \right\}, \quad \bar{x}_N = \left\{ \begin{matrix} \tau_{ab}, \\ \chi \end{matrix} \right\}, \quad (8)$$

Вектор пропускной способности представим в следующем виде:

$$\bar{x}_v = \left\{ \begin{matrix} \mu_{link_ij} \\ \mu_{MUX_i} \\ \mu_{ring_N} \\ \mu_{network} \end{matrix} \right\}, \quad (9)$$

где μ_{link_ij} , μ_{MUX_i} , μ_{ring_N} , $\mu_{network}$ – коэффициенты использования емкости канальных групповых трактов, мультиплексоров, колец и сети в целом.

Общим условием для рассматриваемых моделей с учетом трех критериев, является использование исключительно метода кластерного планирования при построении сетей мобильной связи 5G.

Ограничения для модели с учетом критерия надежности передачи данных описываются следующим множеством:

$$\begin{cases} 2 \leq \tilde{\tau}_{abномин.} \leq 5 \text{ мкс/км}, \\ n_{рест_номин.} \leq 2, \\ 10^{-9} \leq BER \leq 10^{-11}, \\ t_{перкл.SNCP} \leq 30 \text{ мс}, \\ t_{перкл.MSP,MS-SPRing} \leq 50 \text{ мс}. \end{cases} \quad (10)$$

Для модели функциональной надежности ограничения, которые накладываются сектором телекоммуникаций МЭС и операторами телекоммуникаций следующие [1,2]:

- среднее допустимое время прохождения сигнала по маршруту для любой пары узлов составляет 2-5 мкс/км;
- количество рестартов для одного соединения – 2 (устанавливается оператором);
- значение BER в диапазоне $10^{-9} \leq BER \leq 10^{-11}$;
- полная вероятность работоспособности сети должна быть не меньше, чем 0.99999.

Для моделей с учетом критерия пропускной способности применяются следующие ограничения:

$$\begin{cases} v_{ij} \leq v_{link_{ij}}, \\ v_{ring_N} \leq v_{\Sigma_ringN}, \\ 0,7 \leq \mu_{link_ij} \leq 0,8, \\ 0,7 \leq \mu_{MUX_i} \leq 0,8, \\ 0,7 \leq \mu_{ring_N} \leq 0,8, \\ 0,7 \leq \mu_{network} \leq 0,8. \end{cases} \quad (11)$$

Для моделей материальных затрат при создании сети используют ограничения:

$$\begin{cases} C_{MOD} \leq C_{MAX_MOD}, \\ C_{NETWORK} \leq C_{MAXnetwork}, \\ 15 \leq r \leq 30\%, \\ 3 \leq t \leq 5 \text{ лет}. \end{cases}, \quad (12)$$

где C_{MOD} – затраты оператора на модернизацию сети; C_{MAX_MOD} – максимально возможные затраты оператора на модернизацию сети; $C_{NETWORK}$ – капитальные затраты на строительство сети; $C_{MAXnetwork}$ – максимально возможные инвестиционные вложения на строительство сети; r – величина средне рыночной прибыли среди операторов на рынке СНГ в период 2016-2018 гг.; t – период окупаемости инвестиций.

Значения выбранных частных критериев должны отвечать следующим условиям:

- быть положительными и больше нуля:

$$N_i > 0, V_i > 0, C_i > 0; \quad (13)$$

- значения частных критериев и вектора стремятся к минимуму:

$$N_i, V_i, C_i \rightarrow \min, K_i \rightarrow \min. \quad (14)$$

Нахождение оптимального значения основывается на сравнении вариантов по определенным трем критериям с целью определения эффективного варианта. Наиболее приемлемым способом решения поставленной задачи, является метод оптимизации по Парето. То есть, свойством эффективности должно обладать любое решение, претендующее на то, чтобы его назвали оптимальным.

Задачи размещения базовых станций 5G, с учетом частных критериев, решаются в зависимости от производительности базовых станций. На данный момент емкость базовых станций ограничена, поэтому в диссертационной работе решается задача с учетом ограниченной производительности сети и тем условием, что абонент будет обслуживаться в определенный момент только одной базовой станцией. Таким образом, поставленная задача является задачей комбинаторной оптимизации, широко применяемой в планировании и разработке телекоммуникационных сетей. В обобщенном виде цель задачи состоит в размещении определенного количества базовых станций, обслуживающих некоторое множество абонентов при минимальных затратах и с учетом критериев качества. Эту задачу решают, как задачу целочисленного программирования.

В диссертационном исследовании точные методы оптимизации можно использовать для минимизации целевой функции стоимости и демонстрации процесса поиска при решении задач малой размерности. Но использование методов для решения расстановки базовых станций больших размерностей невозможно из-за экспоненциальной зависимости времени работы от количества входных данных.

На современном этапе развития теории оптимизации не известны алгоритмы, обеспечивающие точное решение методов оптимизации за полиномиальное время. В следствии этого точные методы решения заменяются приближенными. Приближенные методы обеспечивают получение оптимального решения за приемлемое время. Использованию приближенных методов обеспечивает решения задач размещения базовых станций большой размерности. Наиболее приемлемым является эвристический генетический алгоритм.

В четвертом разделе работы «Реализация генетического алгоритма для решения задачи оптимального расположения базовых станций в сетях пятого поколения» приведено описание программной реализации предложенного метода с учетом оптимальной многокритериальности, описан интерфейс

разработанного программного обеспечения, приведены результаты компьютерных экспериментов.

На основе анализа различных способов нахождения оптимального размещения базовых станций, в диссертационной работе, для решения поставленной задачи было решено использовать стандартный генетический алгоритм и рекомендации к его применению.

Разработка генетического алгоритма размещения базовых станций, сетей мобильной связи пятого поколения, состоит из четырех этапов.

На первом этапе в разработке генетического алгоритма для оптимального размещения базовых станций для сетей пятого поколения происходит набор особей, которые называются популяцией, то есть определяются различные варианты расстановки базовых станций. При этом число вариантов расстановки может меняться в зависимости от требований к проектируемой сети. Так же определяются типы базовых станций (количество используемых переменных).

На втором этапе происходит отбор наиболее сильных хромосом. При создании начальной популяции определяется первый случайный вариант расстановки базовых станций, не учитывающий ограничения и требования к качеству услуг мобильной связи. Из общего количества базовых станций двух типов производится выборка случайного числа БС1 и БС2.

Далее начинается главный цикл, где происходит оценка родительских хромосом, с учетом расстояния от каждой базовой станции до каждого абонента (радиуса $R1$ и $R2$). Затем осуществляется поиск и подключение абонентов к базовой станции первого типа (микросота). При этом следует учитывать, что суммарный трафик всех абонентов не должен превышать производительность базовой станции. Далее происходит подключение оставшихся абонентов к базовой станции второго типа, в этом случае учитываются ограничения к поставленной задаче. Затем для данного варианта построения сети происходит оценка показателей качества QoS.

После создания новой родительской популяции происходит процесс скрещивания и мутации, это приводит к возникновению новых потомков от предыдущей созданной популяции.

Для задачи размещения базовых станций мутацию можно представить как изменение подключения абонентов к базовым станциям. То есть, если до мутации клиент был подключен к БС 1-го типа, а после мутации переподключен к БС 2-го типа или к двум базовым станциям сразу, но при этом выполняются условия попадания в радиус действия.

Затем происходит проверка условия завершения алгоритма, которое имеет следующий вид:

$$\text{gen} = \text{MAXGEN}, \quad (14)$$

где gen – номер текущего поколения; MAXGEN – максимальное количество поколений (итераций) заданное в начале алгоритма (максимальное значение можно либо увеличивать, либо уменьшать).

Алгоритм может считаться завершенным, когда прекращается поиск минимального значения целевой функции, то есть, когда номер текущего поколения (итерации) достигнет максимального числа поколений (итераций), которое было задано в начале работы алгоритма.

При проведении экспериментов исследования было проанализировано множество случайных задач различной размерности, для подтверждения теоретических предпосылок о необходимости учета коэффициента распространения сигнала в задаче оптимальной расстановки базовых станций для сетей пятого поколения.

Проведен анализ продолжительности работы алгоритма для разного количества абонентов при постоянной численности потенциальных мест расстановки базовых станций и для постоянного количества абонентов и различной численности базовых станций.

Проведена оценка стоимости построения сети в зависимости от количества мест расстановки БС. Результаты представлены в таблице 1, 2 и на рисунках 1, 2, 3.

Таблица 1 – Результаты решения задачи оптимального размещения БС при увеличении числа абонентов

Количество мест расстановки БС	20	25	40	50	70
Стоимость	1594,68	884,052	125,99	124,12	115,99
Время работы алгоритма, сек	255,45	124,11	443,06	476,85	492,90



Рисунок 1 – Зависимость времени работы алгоритма от числа потенциальных абонентов

Таблица 2 – Результаты стоимости построения сети, времени работы алгоритма при увеличении числа места расположения БС.

Количество поколений	20	25	40	50	70
Время работы алгоритма, сек	1594,68	884,052	125,99	124,12	115,99
Значение целевой стоимости	255,45	124,11	443,06	476,85	492,90
Количество неподключенных абонентов	0	10	15	22	32

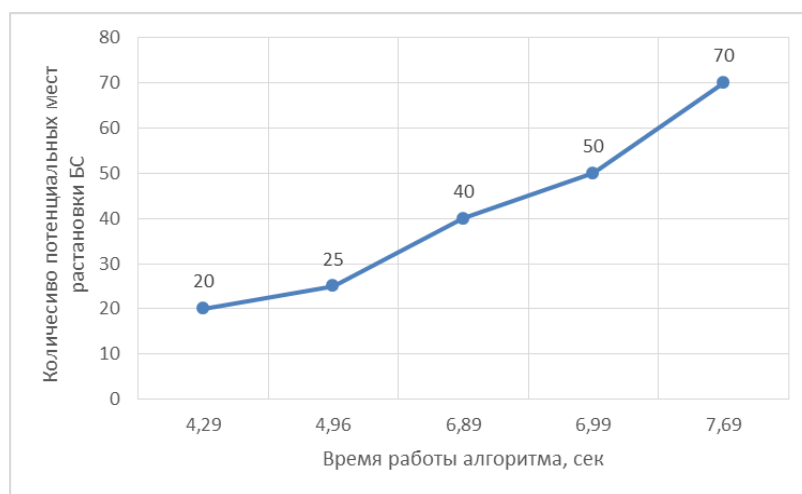


Рисунок 2 – Зависимость времени работы алгоритма от количества потенциальных мест расстановки базовых станций



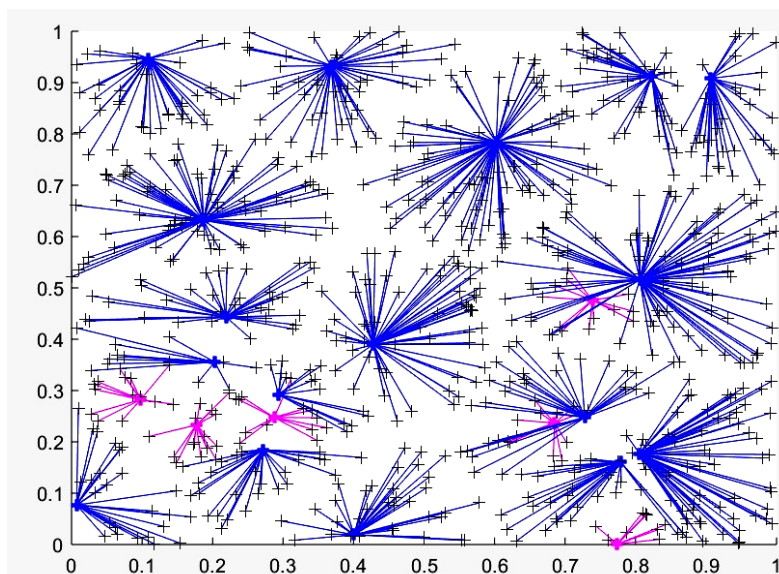
Рисунок 3 – Зависимость стоимости проектируемой сети от количества потенциальных мест расстановки базовых станций

Анализ полученных результатов дает основание утверждать следующее:

- увеличение количества абонентов влияет на скорость решения задачи в большей степени, чем рост числа мест кандидатов;
- стоимость проектируемой сети обратно пропорционально количеству абонентов, с

Результатом работы программы является визуальная схема, которая выводится на экран. На схеме отображается конфигурация расположения базовых станций первого и второго типа, абоненты, подключенные к каждому типу базовых станций и информация об их количестве, количество абонентов, не подключенных и не обслуживаемых сетью, число потенциальных клиентов в зоне работы базовых станций. Вследствие анализа расстановки базовых станций, с учетом количества подключенных, не подключенных и необслуживаемых абонентских станций на схему выводится стоимость данной конфигурации подключения базовых станций.

Разработанный генетический алгоритм обеспечивает оптимальное соотношение между качеством полученного решения и временем, потраченным на его поиск. Визуализация полученных результатов представлена на рисунках 4, 5.



Общее значение функционала SUM=287800.00
 Количество станций первого типа БС1 - 17
 Количество станций второго типа БС2 - 6
 Общее количество потенциальных клиентов - 800
 Общее количество клиентов в "освещенной" зоне - 800
 Количество клиентов, подключенных к БС2 - 75
 Количество клиентов, обслуживаемых сетью - 800
 Количество клиентов, НЕ обслуживаемых сетью - 0

Рисунок 4 – Схема расстановки базовых станций для сети пятого поколения с учетом коэффициента распространения g_{km} .

Из схемы (рисунок 4) расстановки базовых станций видно, что из всех 800 потенциальных абонентов, к базовым станциям первого типа (их количество составило 17) подключено 725 абонентов, а к базовым станциям

второго типа (6 шт.) – 75 абонентов. При этом стоимость такой сети составляет 287800,00 у.е., что является минимальным значением из всей выборки. Подключения базовых станций второго типа происходит только в том случае, если исчерпан ресурс производительности макро базовых станций.

На рисунке 5 изображена схема подключения абонентов без учета коэффициента распространения сигнала и типа местности, анализ которого говорит о том, что расстановка происходит неравномерно. При этом не учитывается радиус действия базовых станций за счет коэффициента распространения сигнала, 257 абонентов из 800 не были подключены, в следствие чего значение целевой функции (стоимость проектируемой сети) из-за штрафов за каждого не подключенного абонента составила 12073663.0 у.е.

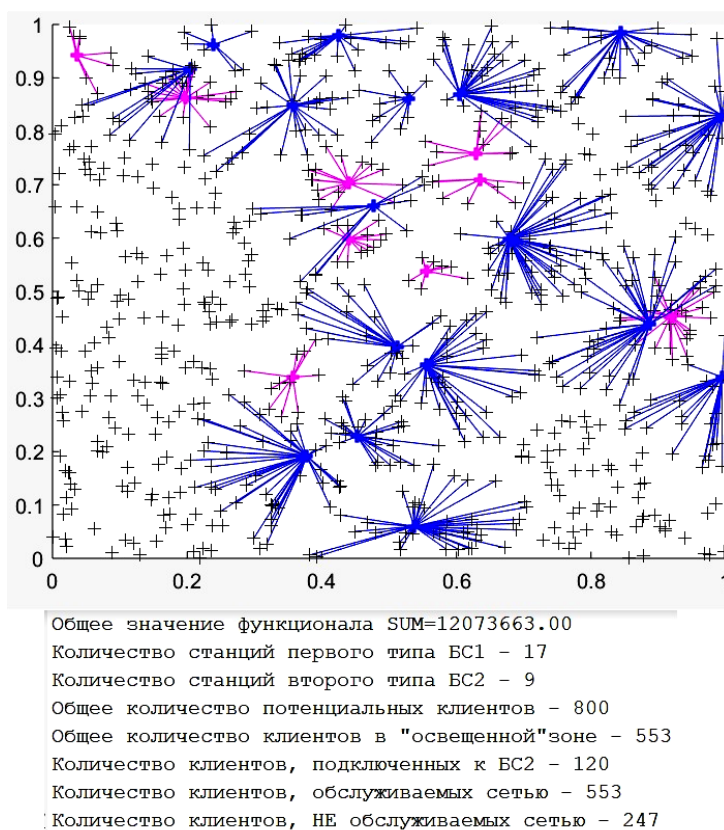


Рисунок 5 – Схема расстановки базовых станций для сети пятого поколения без учета коэффициента распространения g_{km} и типа местности.

Из представленных результатов видно, что разработанный метод расстановки базовых станций сети 5G с использованием генетического алгоритма дает возможность создать конфигурацию размещения базовых станций, область подключения клиентов с учетом оптимальных значений выбранных критериев и коэффициента распространения g_{km} и типа местности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования территориального планирования систем сотовой связи 5G на основе усовершенствованных методов оптимальной расстановки базовых станций для сетей пятого поколения с учетом критериев качества QoS.

Основные научные результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом.

1. Рассмотрена структура существующих стандартов сотовой связи, выполнен анализ качества обслуживания абонентов с целью определения эффективности функционирования сети. Анализ качества обслуживания абонентов показал, что заявленные требования не выполняются, что свидетельствует о низкой эффективности существующих методов планирования радиосетей.

2. Рассмотрена эволюция операторов сотовой связи, определены тенденции развития радиотехнологий в мире, вследствие чего сформулированы требования к сетям нового поколения (5G). Это позволило определить направление, в котором необходимо проводить повышение эффективности функционирования сетей сотовой связи.

3. Выполнен анализ методов частотно-территориального планирования сетей сотовой связи, в результате которого предлагается использовать усовершенствованный метод кластерного частотно-территориального планирования для сети 5G.

4. Проведенный анализ математических моделей расчета затухания в пространстве, в зависимости от условий распространения радиоволн, показал, что большинство моделей, которые применялись в прошлых поколениях связи, непригодны для использования в 5G. Это объясняется тем, что они разработаны для частот ниже 2 ГГц. В работе предлагается использовать канальную модель распространения сигналов SUI, которая хорошо подходит для проектирования, разработки и тестирования беспроводных сетей фиксированного доступа в диапазоне 1-5 ГГц.

5. Определены ключевые показатели качества предоставляемых услуг и производительности сети. Для усовершенствованного метода решения задач многокритериальной оптимизации определены три частных критерия: функциональная надежность N , пропускная способность V , капитальные затраты C . Усовершенствованный метод позволяет работать с задачами, в которых другие методы уже неприменимы из-за обилия альтернатив и пересечения их значимости.

6. Предложена модифицированная постановка задачи размещения базовых станций, учитывающая потери сигналов в радиоканале на основе канальной модели SUI.

7. Рассмотрены эвристические алгоритмы, позволяющие решать задачу синтеза топологической структуры беспроводной сети. Этими алгоритмами

являются генетический алгоритм и алгоритм муравьиной колонии. Предложена программная реализация, обеспечивающая решение задач размещения базовых станций различной размерности, позволяющая определить конфигурацию сети и рассчитать суммарную стоимость построения такой сети, учитывая критерии показателей качества. Однако, следует отметить, что предложенная программная реализация является лишь дополнительным модулем к программному комплексу и не является полноценным программным обеспечением для планирования и оптимизации сетей пятого поколения.

8. Проведенное компьютерное моделирование размещения базовых станций с применением разработанного метода, показало улучшение зоны покрытия сети на 30,1%, что подтверждает теоретическое обоснование и возможность его применения для поставленной задачи.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки ДНР:

1. Павловская, К.А. Задача оптимального размещения базовых станций в сетях пятого поколения / **К.А. Павловская** // Сборник научных трудов ДОНИЖТ, 2019 №55 – Донецк, 2019. – С. 19-23.

2. Павловская, К.А. Многокритериальная оптимизация построения сетей пятого поколения на основе системного анализа / **К.А. Павловская**, В.Н. Лозинская, И.Н. Яремко // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – Вып. 4 (20). – С. 111-117.

3. Павловская, К.А. Анализ моделей расчёта потерь мощности сигнала в сетях сотовой связи 5G / **К.А. Павловская**, И.Н. Яремко // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2020. – Вып. 1 (21). – С. 140-146.

4. Павловская, К.А. Применение генетического алгоритма для решения задач размещения базовых станций в сетях пятого поколения / **К.А. Павловская** // Информатика и кибернетика, Донецк, ДонНТУ, 2019. - № 4(18). - С. 29-34.

5. Яремко, И.Н. Анализ модели распространения радиоволн SU1 для решения задач построения сетей сотовой связи 5G / И.Н. Яремко, **К.А. Павловская** // Сборник научных трудов ДОНИЖТ, 2020 №56 – Донецк, 2020. – С. 26-31.

- в других изданиях:

6. Павловская, К.А. Анализ методов автоматической идентификации параметров сетей стандартов 4G LTE и 5G / **К.А. Павловская**, И.Н. Яремко // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы междунар. науч. - техн. конф. Севастополь, 11-15 сентября 2017 Севастопольский

государственный университет; науч. ред. В.Я. Копп – г. Севастополь: СевГУ, 2017. –С. 139-143.

7. **Павловская, К.А.** Требования к сетям 5G, перспективы развития / **К.А. Павловская** // Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы : материалы II Респ. с междунар. участием науч.-практ. конф., 31 окт. 2019 г. – Донецк : ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2019.- С. 200-203.

8. **Павловская, К.А.** Применение методов территориального планирования для сетей пятого поколения. / **К.А. Павловская** // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2019): сборник трудов XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 4–7 декабря 2019 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2019. Т. 1. –С. 101-106.

АННОТАЦИЯ

Павловская К.А. Обоснование метода территориального планирования систем сотовой связи 5G на основе многокритериальной оптимизации. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки). – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2020.

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования территориального планирования систем сотовой связи 5G, позволяющие оптимально расставлять базовые станции для сетей пятого поколения с учетом критериев качества QoS.

Для решения поставленной задачи проанализированы существующие модели и методы территориального планирования систем сотовой связи. Разработаны критерии оценки эффективности решения оптимизационной задачи для планирования мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G. Разработан и обоснован усовершенствованный метод определения мест расположения базовых станций сотовых сетей 5G с оптимальными показателями качества QoS. Разработан комплекс программ для моделирования оптимальной расстановки базовых станций в сетях 5G для различных типов местности.

Ключевые слова: сотовые сети, сигнал, качество, абонент, стоимость, базовая станция, подключение, пятое поколение, сота, анализ, метод.

ABSTRACT

Pavlovskaya K.A. Justification of the method of territorial planning of 5G cellular communication systems based on multi-criteria optimization.

Ph.D. (Candidate's) These in Engineering Science by specialty 05.13.01 - System analysis, management and information processing (by industry) (technical

sciences) - GOUVPO "DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY", Donetsk, 2020.

In the thesis, a theoretical justification is given and a solution of the scientific and practical problem of improving the territorial planning of 5G cellular communication systems is given, which allow optimal arrangement of base stations for fifth generation networks, taking into account QoS quality criteria.

To solve this problem, the existing models and methods of territorial planning of cellular communication systems are analyzed. The developed criteria for evaluating the effectiveness of solving the optimization problem for planning the location of base stations of 5G cellular networks. An improved method for determining the location of base stations of 5G cellular networks with optimal QoS - indicators has been developed and justified. A set of programs has been developed for modeling the optimal placement of base stations in 5G networks for various types of terrain.

Keywords: cellular networks, signal, quality, subscriber, cost, base station, connection, fifth generation, cell, analysis, method.