Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ ИУ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА ИУ-7 «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

«Классификация методов выбора расположения базовых станций»

Студент **ИУ7-74Б** _________________ **Золотухин А. В.**

Руководитель НИР _________________ **Степанов В. П.**

Рекомендуемая руководителем НИР оценка _________________

2023 г.

РЕФЕРАТ

Научно-исследовательская работа представляет собой анализ методов выбора расположения базовых станций, а также их классификацию. В работе классифицированы такие методы так генетический алгоритм, метод полного перебора и метод ветвей и границ.

Ключевые слова: классификация, базовая станция, 5G, задача о покрытии множества, генетический алгоритм, модель распространения SUI, модель Окамура-Хата.

Расчетно-пояснительная записка к научно-исследовательской работе содержит 21 страниц, 2 рисунка, 5 таблиц, 14 источников.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

С бурным развитием технологий мобильной связи [1], провайдеры услуг инвестируют огромные средства в сетевую инфраструктуру. Из-за высокой стоимости точное и эффективное планирование мобильной сети становится очень важным. С быстрым ростом масштабов сети и числа пользователей, необходимыми стали эффективные количественные методы оптимального расположения базовых станций.

Оптимальное расположение базовых станций и подключение к ним клиентов позволит обеспечить необходимую производительность сети и требуемое качество услуг при минимальной стоимости. Задача размещения с одним источником обслуживания при минимальной стоимости покрытия. Задача размещения с одним источником обслуживания при наличии ограничений на его пропускную способность относится к классу NP-трудных, поэтому точные методы, обладающие экспоненциальной зависимостью времени работы от количества входных данных, с увеличением размерности задачи теряют свою эффективность. Поэтому при создании сетей большой размерности целесообразно отказаться [2] от классических методов решения в пользу современных технологий оптимизации с полиномиальной сложностью, позволяющих за приемлемое время получить результаты, близкие к оптимальным.

Цель научно-исследовательской работы: классификация методов выбора расположения базовых станций.

Задачами данной научно-исследовательской работы являются:

- проведение анализа предметной области расположения базовых станций;
- описание существующих методов методов выбора расположения базовых станций;
- выделение критериев сравнения методов выбора расположения базовых станций;
- классификация методов выбора расположения базовых станций по выделенным критериям.

1 Методы выбора оптимального местоположения базовых станций

Базовая станция [3] мобильного оператора — это установка, предназначенная для передачи и приёма радиосигналов между мобильными устройствами и сетью сотовой связи. Она является одним из основных компонентов мобильной сети.

Задача определения оптимального расположения базовых станций заключается в выборе подмножества местоположений для базовых станций, которые обеспечивают подключение в целевой области.

Целевая область разбивается на элементарные области одинакового размера.

Каждая элементарная область является потенциальной точкой размещения базовой станции и представляет всех потребителей, находящихся на её территории. Каждая элементарная область получает сигнал от всех передатчиков. Элементарная область считается обслуженной, если одна из метрик сигнала в ней выше порогового значения. Рассматриваемая формулировка предполагает, что частота и мощность всех передатчиков одинаковы.

1.1 Содержательная постановка задачи выбора оптимального местоположения базовых станций

Для решения задачи выбора оптимального местоположения базовых станций необходимо подготовить такие параметры базовых станций как радиус покрытия — максимальный теоретический радиус зоны покрытия БС для связи с устройствами; пропускная способность базовой станции, то есть какой объём данных может передавать станция; стоимость размещения базовой станции.

В беспроводных широкополосных сетях зачастую используются радиоволны сантиметрового диапазона [4]. Отличительной чертой распространения таких радиоволн является почти полное отсутствие явления дифракции и прямолинейность распространения. Волны практически не огибают преград при распространении, поэтому существенное влияние на потерю сигнала оказывают рельеф местности, преграды и погодные условия.

Также при размещении базовых станций обязательно должны быть учтены нормы СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 [5].

Задано множество T элементарных областей, на которые поделена целевая область и с которыми необходимо обмениваться информацией. Также задано множество B мест возможного размещения базовых станций.

С вершинами T необходимо обмениваться информацией. $S = \{s_k\}, k = \overline{1, m}$ — множество типов размещаемых базовых станций. Каждому типу базовой станции, размещённой на вершине множества B приписаны два параметра $s_k = \{\{r_{ij}\}, c_i\}$, где:

— $\{r_{ij}\}$ множество радиусов телекоммуникационного покрытия базовой станции. Параметр r_{ij} характеризует дальность связи между базовой станцией размещенной в вершине $b_i, b_i \in B$ и географическим центром области в вершине, $t_j \in T$;

— c_i — стоимость размещения.

Требуется определить набор типов станций минимальной стоимости из множества S и места размещений этих станций на множестве B, при условии что каждый из объектов множества T попадает в зону обслуживания, хотя бы одной базовой станции.

1.2 Математическая постановка задачи выбора оптимального местоположения базовых станций

Рассмотрим математическую постановку задачи. Можно представить задачу в матричном виде. Пусть $W = (w_{(i,k)j})$ — произвольная матрица с элементами $w_{(i,k)j} \in \{0, 1\}$ без нулевых строк и столбцов. Будем говорить, что в W строка j покрывается столбцом (i, k), если $w_{(i,k)j} = 1$. Подмножество столбцов называется покрытием, если в совокупности они покрывают все строки матрицы W. Пусть каждому столбцу поставлено в соответствие положительное число $c_{(i,k)}$ — стоимость размещения базовой станции типа k на месте i. Требуется найти покрытие минимальной стоимости. Вводя переменные $x_{(i,k)}$, равные 1, если столбец (i, k) входит в искомое покрытие, и равные 0 в противном случае, приходим к следующей формулировке задачи:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} c_{(i,k)} x_{(i,k)} \to \min \tag{1.1}$$

при следующих ограничениях.

Каждый объект t_j должен обслуживаться хотя бы одной базовой станцией.

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} w_{(i,k)j} x_{(i,k)} \geq 1 \tag{1.2}$$

На одном месте b_i может быть размещено не более одной станции.

$$\sum_{k=1}^{m} x_{(i,k)} \leq 1 \tag{1.3}$$

Таким образов задачу выбора оптимального местоположения базовых станций можно представить в виде системы неравенств 1.4.

$$\begin{cases} \begin{array}{ccc} w_{(1,1)1} x_{(1,1)} & + \cdots + & w_{(n,m)1} x_{(n,m)} \geq 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{(1,1)l} x_{(1,1)} & + \cdots + & w_{(n,m)l} x_{(n,m)} \geq 1 \\ x_{(1,1)} & + \cdots + & x_{(1,m)} \leq 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(n,1)} & + \cdots + & x_{(n,m)} \leq 1 \end{array} \end{cases} \tag{1.4}$$

Для всех областей t_j, для которых $w_{ikj} = 1$:

$$\frac{a_{ikj} x_{ik}}{\mu + \sum a_{ikj} x_{ik}} \geq \delta, \tag{1.5}$$

где $\beta \in B$, $\tau \in T$, $a_{ikj} > 0$ — измеренная в j мощность сигнала полученного от станции типа k с места i, $\delta \geq 0$ — нижняя граница SINR, требуемое качество связи, $\mu > 0$ — шум в системе.

Будем считать что приёмник находится в радиусе телекоммуникационного покрытия базовой станции тогда и только тогда, когда у него будет хорошее качество связи с базовой станцией, то есть $\delta \geq 13$дБ. Характеристики качества сигнала [6] приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики качества сигнала с использованием SINR

Качество сигнала	SINR (дБ)
Отличное	$\delta \geq 20$
Хорошее	$13 \geq \delta < 20$
Среднее	$0 \geq \delta < 13$
Плохое	$\delta < 0$

Для нахождения мощности сигнала между отдельными приёмниками и излучателями используется формула [7]:

$$a_{ikj} = W_{ik} - PL(f, d), \tag{1.6}$$

где W_{ik} — мощность излучателя базовой станции, $PL(f, d)$ — потери сигнала с расстоянием d на частоте f.

Для расчёта потерь сигнала могут использоваться различные модели.

1.2.1 Модель распространения радиоволн SUI

Рассматривая влияние рельефа местности на качество сигнала [8], можно выделить три категории:

1. A — горная местность, большая растительность или плотная городская застройка с большим количеством препятствий, вследствие чего большие затухания;
2. B — горная местность и редкая растительность или пригородная зона с разновысотными постройками;
3. C — плоский рельеф и редкая растительность или сельская местность с малым количеством препятствий, наименьшие затухания.

Данная модель используется для диапазона частот 1900 МГц – 11 Ггц [9]. Потери сигнала рассчитываются по следующей формуле:

$$PL(f, d) = 20 \lg \frac{4\pi d_0}{\lambda} + 10\gamma \lg \frac{d}{d_0} + X_f + X_h + s, \tag{1.7}$$

$$\gamma = a - b \cdot h_{bc} + \frac{c}{h_{bc}}, \tag{1.8}$$

$$X_f = 6 \lg \frac{f}{2000}, \tag{1.9}$$

$$X_h = 20 \lg \frac{h_{ab}}{2} \tag{1.10}$$

где $d_0 = 100$м; λ — длина волны, м; γ — экспонента потерь сигнала мобильной связи, дБ; d — расстояние от базовой станции до абонентской, м; h_{bc} и h_{ab} — высоты антенн базовой и абонентской станции, м; X_f — коэффициент коррекции частоты; X_h — коэффициенты коррекции высоты приёмника антенны; f – рабочая частота, МГц; a, b, c — коэффициенты, зависящие от категории местности согласно таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Зависимость коэффициентов от категории местности

Коэффициенты	Категория A	Категория B	Категория C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

1.2.2 Модель Окамуры—Хата

Модель распространения Окамура—Хата [10] используется для частотного диапазона 150 – 1500 МГц, расстояние между базовой станцией и абонентским устройством 1 – 100 метров, высота антенн БС 30–200 метров, высоты антенн абонентских устройств 1 – 10 метров, дальности телекоммуникационной связи 1–20 км.

Модель Окамура-Хата учитывает особенности территории и плотность застройки: открытая сельская местность, пригородная местность и городская местность. Для каждого случая выражается свой расчёт потерь.

Городская местность.

$$L_u = 69.55 + 26.16 \lg f_c - 13.82 \lg h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg R, \tag{1.11}$$

$$L_{fs} = L_u \tag{1.12}$$

где f_c — несущая частота, h_b — высота антенн базовой станции, h_m – высота антенны абонентского устройства, $a(h_m)$ — поправочный коэффициент, R — расстояние между устройствами.

Поправочный коэффициент $a(h_m)$ выражается для малых и средних городов

$$a(h_m) = (1.1 \lg f_c - 0.7)h_m - (1.56 \lg f_c - 0.8) \tag{1.13}$$

и для больших городов

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\lg(1.54h_m))^2 - 1.1, & 150\text{МГц} \leq f_c \leq 200\text{МГц}, \\ 3.2(\lg(11.75h_m))^2 - 4.97, & 400\text{МГц} \leq f_c \leq 1500\text{МГц}. \end{cases} \tag{1.14}$$

Пригородная местность.

$$L_{fs} = L_u - 2(\lg(f_c/28))^2 - 5.4 \tag{1.15}$$

Сельская (открытая) местность.

$$L_{fs} = L_u - 4.78(\lg(f_c))^2 + 18.33 \lg(f_c) - 40.94. \tag{1.16}$$

1.3 Методы решения задачи о покрытии

Рассматриваемая задача является задачей линейного целочисленного программирования, а именно задачей о покрытии множества [11]. Задача о покрытии множествами заключается в нахождении набора подмножеств, покрывающего всё множество и имеющего минимально возможный вес. Задача о покрытии множества относится к числу NP-трудных. Одними из самых популярных методов решения являются метод полного перебора, генетический алгоритм, метод ветвей и границ [12].

1.3.1 Генетический алгоритм

Предложенные в 1975 году Джоном Холландом генетические алгоритмы основаны на принципах естественного отбора и наследования и относятся к стохастическим методам. Эти алгоритмы успешно применяются в различных областях деятельности (экономика, физика, технические науки и т. п.), их используют для решения многих оптимизационных задач. На 1.1 представлена общая схема работы генетического алгоритма.

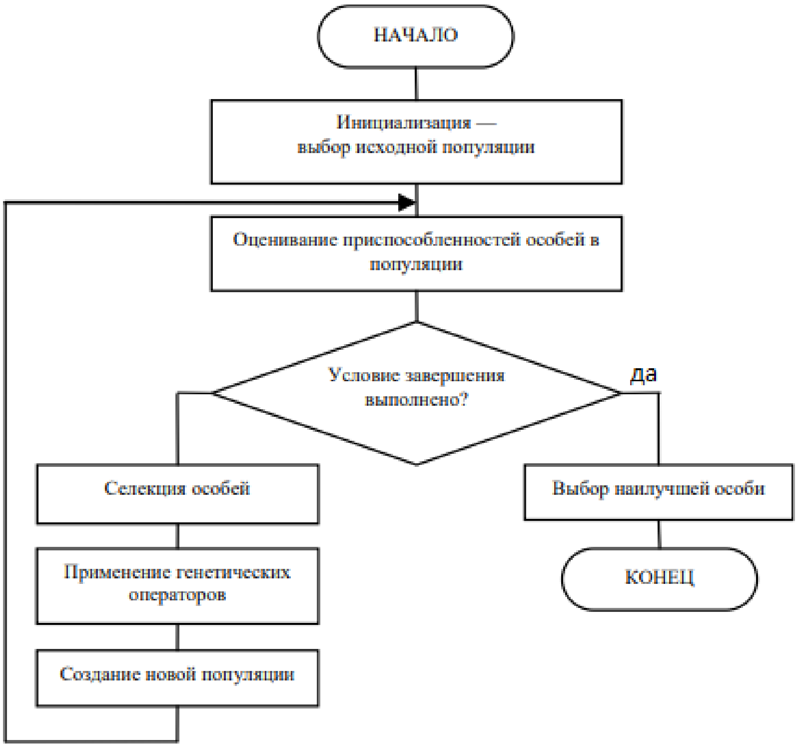

Рисунок 1.1 – Общая схема генетического алгоритма

Представленная схема является общим алгоритмом для решения многих задач, и при применении её к конкретной задаче необходимо выбрать механизм кодирования параметров в гены особи, оптимизационную функцию, условие останова [13]. Авторы модифицировали модель Голдберга и применили её для решения задачи покрытия множеств. В данном случае оптимизационной функцией будет являться минимизация веса покрытия, а условием останова будет неизменность лучшего решения в течение заданного числа поколений.

Рассмотрим механизм кодирования особи. Каждый индивид k представлен хромосомой, являющейся n-мерным вектором x^k, у которого j-й элемент

x_j^k принимает значение 1, если подмножество S_j входит в покрытие, и принимает значение 0, если иначе.

С таким представлением степень приспособленности f_k индивида x^k может быть рассчитана следующим образом:

$$f_k = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j^k, \tag{1.17}$$

где c_j — стоимость подмножества S_j.

Таким образом, оптимизационная функция выглядит как $f_k \to \min$.

Для выбора родительских особей используется случайный отбор. В алгоритме используется тип мутации, основанный на изменении случайного гена на противоположное значение. Оператор скрещивания точечный. Выбираются пары хромосом из родительской популяции. Далее для каждой пары отобранных таким образом родителей разыгрывается позиция гена (локус) в хромосоме, определяющая так называемую точку скрещивания — l_k. В результате скрещивания пары родительских хромосом получается следующая пара потомков: P_1 — потомок, хромосома которого на позициях от 1 до l_k состоит из генов первого родителя, а на позициях от $l_k + 1$ до L — из генов второго родителя; P_2 — потомок, хромосома которого на позициях от 1 до l_k состоит из генов второго родителя, а на позициях от $l_k + 1$ до L — из генов первого родителя.

Начальное поколение состоит из особей, сформированных случайно с помощью алгоритма, подобному жадному алгоритму.

Очень важная деталь работы генетического алгоритма в том, что при скрещивании и мутации могут появится особи, соответствующие покрытия которых не существуют, то есть получаются недопустимые решения. Алгоритм проверяет, существует ли покрытие, и если нет, то пытается, в случае скрещивания, выбрать другую вторую родительскую особь, а в случае мутации — выбрать другой ген для его инвертирования. Если и это не «исправит» особь, родитель выбирается заново случайным образом. Потомок заменяет случайно выбранную особь, если его приспособленность выше.

Рассмотрим на примере, как работает генетический алгоритм и как он избавляется от недопустимых решений. Задача представлена в виде матрицы размером 10x10, заполненной «0» и «1». Столбцы матрицы — это подмножества множества U, а строки — элемента множества U. Таким образом, множество $U = \{x_0, \cdots, x_9\}$, и оно состоит из 10 подмножеств $S = \{S_0, \cdots, S_9\}$. «1» в матрице обозначает, что соответствующее столбцу подмножество покрывает соответствующий строке элемент.

Таблица 1.3 – Матрица подмножеств исходного множества

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
x0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
x1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
x2	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1
x3	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0
x4	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
x5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
x6	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
x7	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
x8	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1
x9	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1

Используем для поиска покрытия генетический алгоритм с 10 особями. Каждая особь соответствует определённому покрытию, поэтому длина особи равна 10 и каждый ген $Ch = \{Ch_0, \cdots, Ch_9\}$ соответствует определённому подмножеству. Если ген особи равен "1 то подмножество входит в покрытие, если «0», то не входит.

На начальном шаге алгоритма особи формируются случайным образом. Представим особи и их гены в виде массива, где строка — особь, столбец — ген особи.

Таблица 1.4 – Формирования начальной популяции

	Ch_0	Ch_1	Ch_2	Ch_3	Ch_4	Ch_5	Ch_6	Ch_7	Ch_8	Ch_9
особь 0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
особь 1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
особь 2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
особь 3	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
особь 4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
особь 5	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
особь 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
особь 7	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
особь 8	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
особь 9	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0

На следующем шаге случайно выбрана родительская особь 1. С некоторой вероятностью к ней применяется оператор одноточечного скрещивания, поэтому случайно выбирается вторая родительская особь 2. Точка скрещивания = ген №3. После скрещивания получаем потомка:

1	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Покрытие, соответствующее этому потомку, существует. С некоторой вероятностью к потомку применяется оператор одноточечной мутации. Случайным образом выбран ген №9, он меняет своё значение на противоположное.

1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Но такого покрытия не существует, алгоритм пытается выбрать другой ген, выбран ген №2.

Особь-потомок:

1	0	1	0	0	1	0	0	0	1

Такое покрытие существует. Далее в поколении случайно выбирается особь №9, которую, возможно, заменит потомок. Приспособленность потомка равная 4 выше приспособленности особи №9 равной 5, поэтому он её заменяет.

Все описанные шаги выбора родительских особей и применения к ним операторов скрещивания и мутации повторяются, пока не будет найдено решение. Алгоритм заканчивает свою работу, если решение не может быть улучшено за заданное число поколений.

1.3.2 Алгоритм полного перебора

Полный перебор — точный метод решения оптимизационных задач, относящийся к классу методов поиска решения исчерпыванием всевозможных вариантов. Сложность полного перебора зависит от количества всех возможных решений задачи.

Полным перебором можно решить любую задачу из класса NP-полных задач. В зависимости от количества всех возможных решений задачи и времени вычисления целевой функции от каждого решения полный перебор может потребовать экспоненциального времени работы.

Идея алгоритма полного перебора для решения задачи покрытия заключается в следующем:

1. Поиск всех возможных сочетаний подмножеств исходного множества и сравнение их целевых функций

2. Определение покрытий среди найденных сочетаний.

3. Нахождение покрытия минимального веса.

Из теории множеств известно, что число всех подмножеств множества из n элементов равно 2^n

1.3.3 Метод ветвей и границ

Данный метод является модификацией алгоритма полного перебора, что гарантирует точность результата его работы. Суть метода заключается в построении дерева полного перебора и отсечении бесперспективных ветвей решения по мере его обхода, что существенно уменьшает время его работы [14]. Дерево перебора в этом случае строится так, что на каждом уровне k для каждого из узлов $k-1$ уровня добавляются в качестве дочерних узлов все возможные варианты $a_{kj}x_j$. Для поставленной задачи на каждом уровне добавляется количество узлов, равное количеству $a_{kj} \neq 0$. Алгоритм полного перебора предполагает полный обход такого дерева. Алгоритм после обработки каждого узла k-ого уровня приступает к обработке дочерних узлов прежде, чем переходит к следующему узлу k-ого уровня. Метод ветвей и границ сокращает время поиска оптимального решения за счет того, что при вхождении в каждый узел выполняется верхняя и/или нижняя оценка возможного решения, к которому приведет обход поддерева, корнем которого является текущий узел. В соответствии с полученной оценкой делается вывод — если лучшее из возможных решений хуже текущего, то данное поддерево (ветвь) отсекается и обход продолжается со следующего узла того же уровня, на котором было произведено отсечение.

Таким образом, ключевым аспектом работы алгоритма по методу ветвей и границ является эффективная оценка поддерева, обязательным требованием к которой также является недопустимость потери точности. Поскольку алгоритм оценки поддерева опирается на текущее решение, инициализация начального решения оставляется на усмотрение разработчика. Возможны четыре варианта инициализации:

1. Заполнение решения максимальными значениями.

2. Выбор случайного покрытия.

3. Последовательная инициализация лучшими значениями.

4. Нахождение решения приближенным алгоритмом.

Пусть N — текущее решение задачи, то есть минимальное найденное количество подмножеств Si, покрывающих исходное множество U. В таком случае, минимальное улучшение равняется $N-1$. Текущим состоянием M назовём число подмножеств S_i, покрывающих сформированный на данном этапе набор. При $M = N - 1$ выполняется проверка: если среди непокрытых переменных есть хотя бы одна, которая не покрывается подмножествами S_i, формирующими состояние M, то минимальное улучшение невозможно, следовательно, данная ветвь считается бесперспективной и отбрасывается. В противном случае текущее состояние M становится текущим решением задачи.

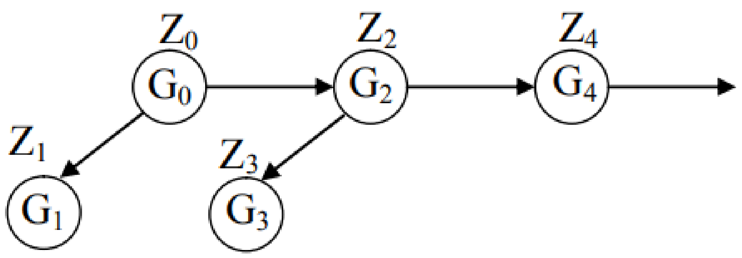

Рисунок 1.2 – Метод ветвей и границ

2 Классификация методов выбора оптимального местоположения базовых станций

В качестве критериев классификации были выбраны такие критерии, как точность и вычислительная сложность.

В таблице 2.1 приведена классификация алгоритмов полного перебора, метода ветвей и границ [15] и генетического алгоритма [11].

Таблица 2.1 – Формирования начальной популяции

Критерий	Алгоритм полного перебора	Метод ветвей и границ	Генетический алгоритм
Вычислительная сложность	$O(n!)$	$O(n^5 \log_2(n))$	$O(n * m)$
Точность	Точный	Точный	Приближенный

Из таблицы можно сделать вывод, что генетический алгоритм применим, когда покрыть связью большую площадь. Метод ветвей и границ из-за большой вычислительной сложности применим в тех случаях, где необходимо обеспечить связью небольшой район.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная цель была достигнута: проведена классификация методов оптимального расположения базовых станций.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы были решены следующие задачи:

— проведение анализа предметной области расположения базовых станций;

— описание существующих методов методов выбора расположения базовых станций;

— выделение критериев сравнения методов выбора расположения базовых станций;

— классификация методов выбора расположения базовых станций по выделенным критериям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нечаева М.Л. Совершенствование управления базовыми станциями операторов мобильной связи в условиях рынка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. Т. 12, № 3. — 2019 г. — С. 142–152.

2. Ермолаев С.Ю., Карташевский В.Г., Штовба С.Д. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В СЕТЯХ IEEE 802.16-2004 // ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ, № 12 — 2010 г. — С. 54 – 58.

3. Из чего состоит базовая станция операторов сотовой связи | Блог ДалСвязь [Электронный ресурс]. Режим доступа: `https://dalsvyaz.ru/articles/iz-chego-sostoit-bazovaya-stanciya-operatorov-sotovoj-svyazi?ysclid=lqa32obfn4706994338` (дата обращения 27.10.2023).

4. Данилов В. И. Сети и стандарты мобильной связи : учебное пособие / СПбГУТ. — СПб., 2015. — 100 К.

5. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов". — М.:Минздрав России, 2003.

6. 5G signal quality parameters [Электронный ресурс]. Режим доступа:`https://support.zyxel.eu/hc/en-us/articles/4406391493778-5G-signal-quality^parameters` (дата обращения: 29.10.2023).

7. WLAN Network Planning Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: `https://support.huawei.com/enterprise/ru/doc/EDOC1000113315/c3242b10/po` (дата обращения 27.10.2023).

8. И. Н. Яремко, К. А. Павловская Анализ модели распространении радиоволн SUI для решения задач построения сетей сотовой связи 5G // Сборник научных трудов ДонИЖТ — 2020 г. №56. — С. 26–30.

9. Cabuk U. C., Tosun M., Jacobsen R. H., Dagdeviren O. Path Loss Estimation of Air-to-Air Channels for FANETs over Rugged Terrains // 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 — С. 1 – 4.

10. Hata, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 1980 г. № 3 — С. 317–325.

11. Еремеев А. В., Заозерскал Л. А., Колоколов А. А. ЗАДАЧА О ПОКРЫТИИ МНОЖЕСТВА: СЛОЖНОСТЬ, АЛГОРИТМЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ // ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ Т. 7, № 2. — 2000 г. — С. 22–46.

12. Коновалов И. С., Остапенко С. С., Кобак В. Г. Сравнение эффективности работы точных и приближенных алгоритмов для решения задачи о покрытии множества // Advanced Engineering Research, Ростов-на-Дону. — 2017 г. №3 — С. 137–144.

13. Коновалов И. С., Фатхи В. А., Кобак В. Г. Применение генетического алгоритма для решения задачи покрытия множеств // Advanced Engineering Research, Ростов-на-Дону. — 2016 г. №3 — С. 125–132.

14. Алексеев О. Г., Григорьев В. Ф. Некоторые алгоритмы решения задачи о покрытии и их экспериментальное исследование на ЭВМ // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., СССР — 1984 г. — С. 1565 – 1570.

15. Ромм Я. Е., Назарьянц Е. Г. Полиномиальная сложность параллельной формы метода ветвей и границ решения задачи коммивояжера // Известия ЮФУ. Технические науки. №4 — 2015 г. — 165 с.