

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ В ГЛОБАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ

Т.В. Леванова^{1,2}

к.ф.-м.н., доцент, e-mail: levanovat@gmail.com

А.В. Гетте²

аспирант, e-mail: gette4aleks@yandex.ru

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

²Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Омский филиал, Омск, Россия

Аннотация. Глобальные спутниковые сети обеспечивают связь не только в различных точках Земли, но и в отдалённых регионах, где прокладка кабельных линий невозможна или затруднена. Для обеспечения связи на больших территориях необходимо разместить наземные станции, которые взаимодействуют со спутниковыми системами. Решение проблемы размещения и проектирования наземных станций можно разделить на два этапа. На первом этапе определяют набор строящихся наземных станций и конфигурации их оборудования. На втором этапе происходит регулярный расчёт маршрутов пакетов данных в каждом временном интервале с учётом запросов от клиентов и текущего состояния сети связи. Качество обслуживания клиентов в интервале времени измеряется как среднее количество потерянных или не маршрутизированных пакетов в единицу времени. Ранее при решении задачи маршрутизации предполагалось, что все станции и передающие устройства уже выбраны. В данной работе задача рассматривается как двухэтапная, в которой необходимо решать вопросы первого и второго этапов вместе. Критерием служит минимизация общего числа потерянных пакетов. Для этого построены генетический алгоритм и алгоритм генетического локального поиска, выполнено их экспериментальное исследование, проведено сравнение с другими алгоритмами.

Ключевые слова: задача размещения, задача маршрутизации, генетический алгоритм, локальный поиск, глобальная сеть.

Введение

Глобальные системы связи являются современным средством передачи данных. Они обеспечивают связь в любой точке Земли и широко используются в нефтегазовой отрасли, сетевой торговле, спасателями, путешественниками и т. п. Организация спутниковой связи – это высокотехнологичный процесс, требующий значительных затрат, в том числе на оборудование. Для обеспечения связи на больших территориях необходимо разместить наземные станции, которые будут взаимодействовать со спутниковыми системами.

В данной работе предложены варианты решения задачи определения мест расположения и конфигураций наземных станций в глобальной сети спутниковой связи. Предполагается, что сеть состоит из спутников на низкой околоземной орбите, наземных станций (обеспечивающих доступ в Интернет) и центра управления сетевыми операциями (см., например, [1, 2]). От источника данных пакеты информации передаются через наземные станции спутникам, а затем со спутников – потребителям. В каждом потенциальном месте расположения такая станция может быть создана в соответствии с одним из возможных вариантов или не создаваться вообще. Конструкция наземной станции определяется пропускной способностью соединений со спутниками, пропускной способностью соединений с другими наземными станциями через наземную сеть «Интернет» и стоимостью использования данной конструкции наземной станции в единицу времени. Предполагается, что система работает в дискретных временных интервалах, которые достаточно малы, чтобы предположить, что качество каналов связи и требования клиентов не меняются в течение одного периода.

Маршруты пакетов данных для каждой пары «источник–назначение» рассчитываются в центре управления сетевыми операциями в режиме реального времени, и каждый узел (спутниковая или наземная станция) получает маршруты для всех пакетов, исходящих от этого узла. Каждый пакет, отправляемый из источника в пункт назначения, содержит некоторое содержимое данных и маршрут пакета. Максимально допустимое число рёбер в путях передачи пакетов вводится из-за технического ограничения на количество битов, зарезервированных для кодирования пути передачи пакетов. Короткие пути передачи пакетов также обычно имеют низкую задержку. Для простоты предполагается, что каждая система описывается за один временной интервал, и все требования к этому временному интервалу известны заранее.

Таким образом, для решения проблемы создания глобальной спутниковой связи на первом этапе необходимо решить задачу определения места размещения и выбора конфигурации наземных станций; на втором этапе требуется решить задачу маршрутизации пакетов информации. Решение проблемы маршрутизации пакетов описано в работах [3, 4]. В этих работах все передающие устройства считались уже выбранными и сконструированными. Новизна данной работы заключается в том, что задача определения местоположения и настройки наземных станций для глобальной сети спутниковой связи (задача первого этапа) объединена с задачей маршрутизации пакетов (задача второго этапа). Для решения этой двухэтапной задачи оптимизации предложены генетические алгоритмы, выполнено их экспериментальное исследование с предыдущими разработками.

Работа организована следующим образом. В разделе 1 сформулированы задачи маршрутизации пакетов, размещения и проектирования наземных станций, выписаны математические модели. В разделе 2 описаны разработки авторов для решения задачи размещения наземных станций. В разделе 3 показаны вычислительные исследования, проведён сравнительный анализ результатов алгоритмов решения поставленной задачи.

1. Проблема размещения и проектирования станций

Решение проблемы размещения и проектирования наземных станций можно разделить на два этапа: размещение наземных станций и выбор проектной конфигурации для каждой из них (первый этап); маршрутизация информационных пакетов между клиентами в течение определённого интервала времени (второй этап). Переменные решения на первом этапе определяют набор строящихся наземных станций и варианты их проектирования. На втором этапе рассчитываются маршруты пакетов в каждом временном интервале с учётом сеансовых запросов от клиентов и текущего состояния сети связи. Качество обслуживания в интервале времени измеряется как среднее количество потерянных или не маршрутизированных пакетов в единицу времени, т. е. разница между количеством пакетов для запрошенных сеансов и количеством маршрутизированных пакетов. Количество маршрутизируемых пакетов рассматривается в качестве критерия максимизации. В качестве ограничения вводится общий бюджет на использование наземных станций в течение определённого периода.

1.1. Постановка задачи маршрутизации пакетов

В задаче маршрутизации пакетов даны: $G = (V, E)$ – оргграф, где V – набор спутников и наземных станций, а E – множество соединений (каналов); $n = |V|$, $m = |E|$; $u(e) \geq 0$ – пропускная способность соединения e ; N – общее количество активных сеансов в системе.

Сессия i представлена тройкой (A_i, B_i, W_i) , $i = 1, \dots, N$, где $A_i, B_i \in V$ – пара узлов «источник–назначение», W_i – трафик данных за единицу времени во время сессии. Каждая сессия рассматривается как связь между узлами графа G (наземными станциями или спутниками), к которым в данный момент подключены пользователи; L – максимально допустимое число рёбер в пути передачи пакета; $\tau(e)$ – задержка в передаче данных по каналу $e \in E$.

Задача заключается в том, что требуется найти набор путей в G таким образом, чтобы каждая сессия соответствовала не более чем одному маршруту, и так, чтобы маршрутизировалось максимально возможное количество пакетов.

Задача имеет ограничения, заключающиеся в том, что максимальное количество дуг на каждом пути не превышает L и что для каждой дуги e общий объём информации, передаваемой по всем проходящим маршрутам, не должен превышать пропускную способность $u(e)$ [3, 4].

В предыдущих публикациях теоретически и экспериментально изучались различные подходы к решению проблемы маршрутизации пакетов и обсуждались основанные на графах модели сети с различными уровнями детализации. В этих работах все передающие устройства считались уже выбранными и сконструированными [3, 4]. В настоящей работе, наоборот, решается задача выбора мест размещения и конструкций, а алгоритм решения задачи маршрутизации используется как «чёрный ящик».

1.2. Постановка задачи размещения и проектирования наземных станций

В каждом потенциальном месте расположения наземной станции такая станция может быть создана в соответствии с одним из возможных вариантов или не создаваться вообще. Конфигурация наземной станции характеризуется: 1) пропускной способностью соединений со спутниками; 2) пропускной способностью соединений с другими наземными станциями; 3) стоимостью использования этой станции в единицу времени.

Введём обозначения: I – множество местоположений для наземных станций; D – допустимый бюджет, который будет использован на строительство и эксплуатацию наземных станций; R – набор конфигураций, возможных для каждой наземной станции; c_i^r – стоимость открытия станции конфигурации типа r в пункте i .

Переменные задачи $z_i^r = 1$, если в i размещена станция с конфигурацией r , 0 – иначе, $i \in I$.

Обозначим $f(Z)$ решение проблемы маршрутизации пакетов, заданное матрицей конфигураций $Z = (z_i^r)$. Требуется разместить наземные станции таким образом, чтобы общее количество маршрутизируемых пакетов было максимальным.

Таким образом, математическая модель задачи размещения наземных станций для глобальной сети спутниковой связи будет выглядеть следующим образом:

$$f(Z) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} c_i^r z_i^r \leq D; \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R} z_i^r \leq 1, i \in I; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} z_i^r \geq 1; \quad (4)$$

$$z_i^r \in \{0; 1\}; i \in I, r \in R. \quad (5)$$

Здесь (1) отражает цель выбрать места размещения и оборудование наземных станций, обеспечивающих наименьшее число потерянных пакетов. Условие (2) задаёт ограничение на бюджет. Неравенство (3) позволяет размещать в каждом пункте станцию только с одним типом конфигурации. Выражение (4) учитывает, что для работы всей сети необходимо размещение хотя бы одной станции.

С помощью моделей, подобных (1)–(5), описываются так называемые варианты задачи размещения. В них помимо выбора места размещения необходимо определить вариант функционирования предприятия, тип оборудования, вид продукции и т. п. Информацию о таких задачах можно найти, например, в [5, 6].

2. Алгоритмы решения

В данной работе для рассматриваемой задачи предложены варианты генетического алгоритма и генетического локального поиска.

Генетический алгоритм представляет собой универсальную схему решения широкого круга прикладных задач (см., например, [7–10]). Его основная идея состоит в

компьютерном моделировании эволюционного процесса. Для описания алгоритма традиционно применяются термины из биологии.

В начале работы алгоритма задаётся «искусственная» популяция особей, каждая из которых представляет собой элемент в пространстве решений задачи. Приспособленность особей описывается с помощью некоторой монотонной функции от значения целевой функции задачи. Приспособленность тем выше, чем лучше решение. Как и в биологии, имитируется мутация генов и рекомбинация. Развитие популяции происходит за счёт исключения из неё более «слабых» особей и добавления более «сильных». Отбор осуществляется с помощью различных операторов селекции (пропорциональной, турнирной, срезающей).

Генетический локальный поиск – это метод оптимизации, который сочетает в себе преимущества генетического алгоритма и локального поиска. Основная идея генетического локального поиска заключается в том, что генетический алгоритм используется для создания первоначальной популяции, а затем локальный поиск применяется к каждому из полученных решений. Генетический локальный поиск считается более эффективным, чем простые генетические алгоритмы, потому что он способен находить оптимальные или близкие к оптимальным решения за меньшее количество итераций. Кроме того, генетический локальный поиск более устойчив к проблеме преждевременной сходимости, которая возникает у генетических алгоритмов, когда они останавливаются в локальных оптимумах вместо глобальных. Примером задач, которые могут быть решены с использованием генетического локального поиска, являются задачи транспортной логистики, распределения ресурсов и оптимизации производственных процессов и др. [11, 12].

2.1. Генетический алгоритм

Генетический алгоритм (ГА) основан на так называемой стационарной схеме воспроизводства [10], при которой на каждой итерации генерируется пара новых особей, заменяющих пару «неперспективных» особей в популяции. После заданного числа итераций алгоритм завершает работу, лучшее найденное решение возвращается в качестве результата. Создание пары новых генотипов «потомков» начинается с выбора пары «родительских» особей из текущей популяции с помощью вероятностного оператора селекции. К генотипам выбранных особей применяется оператор кроссинговера, заменяющий часть генов одного генотипа на гены другого. Оба полученных после кроссинговера генотипа подвергаются оператору мутации, при котором некоторое подмножество генов изменяется случайным образом.

Для описания схемы алгоритма введём обозначения: $f(Z)$ – функция приспособленности; λ – количество особей; $B = \{1, \dots, \lambda\}$ – множество всех генотипов, здесь λ – чётное, $x \in B$ – особь; $Sel : B^\lambda \rightarrow \{1, \dots, \lambda\}$ – оператор селекции; $Mut : B \rightarrow B$ – оператор мутации; $Cross : B \times B \rightarrow B \times B$ – оператор кроссинговера. Популяцию поколения $t \geq 0$ обозначим $X^t = (x^{1t}, \dots, x^{\lambda t})$. Итерацией генетического алгоритма является переход от популяции X^t к популяции X^{t+1} . Схема генетического алгоритма приведена ниже (Algorithm 1).

В данной работе при построении генетического алгоритма используются турнирная селекция, одноточечный кроссинговер, одноместный оператор мутации [9].

Algorithm 1 Схема генетического алгоритма

```

1: Инициализация: положить  $t \leftarrow 0$ .
2: for  $k = 1, \dots, \lambda$  do построить случайным образом особь  $x^{k,0}$ .
3: end for
4: while не выполнено условие остановки do
5:   for  $k \leq \lambda/2$  do выполнять:
6:     Sel: выбрать особи  $x \leftarrow x^{Sel(X^t),t}, y \leftarrow x^{Sel(X^t),t}$ .
7:     Cross: построить  $(x', y') \leftarrow Cross(x, y)$ .
8:     Mut: положить  $x^{2k-1,t+1} \leftarrow Mut(x')$ ,  $x^{2k,t+1} \leftarrow Mut(y')$ .
9:   end for
10:  Положить  $t \leftarrow t + 1$ .
11: end while
12: Результат: лучшая найденная особь.

```

2.2. Генетический локальный поиск

Как и в случае с классическим генетическим алгоритмом, генетический локальный поиск начинается с генерации первоначальной популяции решений, которая затем проходит через процесс селекции, кроссинговера и мутации для формирования новых поколений популяции. Однако, в отличие от классического генетического алгоритма, генетический локальный поиск включает в себя использование локального поиска на каждой итерации для улучшения подмножества решений, отобранных из популяции. Таким образом, генетический локальный поиск объединяет преимущества глобального поиска и локальной оптимизации для достижения более точных решений в задачах оптимизации. Схема алгоритма генетического локального поиска приведена ниже (Algorithm 2).

Algorithm 2 Схема генетического локального поиска

```

1: Инициализация.
2: Построить начальную популяцию.
3: while не выполнено условие остановки do
4:   Выбрать двух родителей из популяции.
5:   Построить по ним новое решение.
6:   Применить к нему алгоритм локального улучшения.
7:   Выбрать двух родителей из популяции.
8:   if новое решение лучше худшего в популяции then
9:     обновить популяцию.
10:  end if
11: end while
12: Результат: лучшая найденная особь.

```

2.3. Поиск с чередующимися окрестностями

Для сравнительного анализа работы предложенных алгоритмов использовался алгоритм локального поиска с чередующимися окрестностями (Variable Neighborhood Search Algorithm, VNS). Этот алгоритм, так же как и генетические алгоритмы, принадлежит к методам приближённого решения. Он основан на систематической смене окрестностей [13]. В настоящее время этот подход применяется к широкому кругу прикладных задач (см., например, [13–15]). В данной работе используется вариант алгоритма, предложенный ранее авторами к задаче проектирования глобальной сети спутниковой связи [16]. Для его реализации были введены три вида окрестностей, учитывающих специфику задачи. Одна из них (в [16] и здесь обозначена N_1) использовалась в генетическом локальном поиске.

Сопоставим матрице Z вектор y так, что $y_i = r \Leftrightarrow z_i^r = 1, i \in I, r \in R$.

Определение 1. Окрестностью N_1 целочисленного вектора y называется множество допустимых решений y' , полученных путём увеличения одной из компонент y_i на 1, $i \in I$.

3. Экспериментальные исследования

Тестовые примеры были построены на основе серии тестов для задачи размещения и проектирования наземных станций в глобальной спутниковой сети [4]. Пары узлов были сгенерированы для приближённого моделирования коммуникационных потоков в глобальном масштабе. Предполагалось, что количество пользователей пропорционально численности населения. Исходными и конечными узлами каждого сеанса были случайно сгенерированные пользователи. Пользователи были привязаны к ближайшей наземной станции или спутнику. Предполагается, что пропускная способность канала находится в пределах от 100 до 300 Мбит/с. Скорость передачи данных в каждом сеансе по служебному каналу голосовой связи составляет 9600 бит/с [16].

Вычислительный эксперимент был проведён на 6 тестовых примерах, в каждом из них общее количество переданных пакетов составило 2 355 465 600. Вычисление начального количества потерянных пакетов в каждом примере описано в работах [3, 4], результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Начальное количество потерянных пакетов

Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4	Пример 5	Пример 6
2435×10^5	2235×10^5	2219×10^5	2477×10^5	2220×10^5	2237×10^5

Следует ожидать, что комплекс программ, в котором на первом этапе проводится оптимизация, должен улучшить предыдущие результаты из [3, 4]. Однако было интересно, насколько возможно такое улучшение.

Для каждого примера алгоритмы работали в течение одного и того же промежутка времени, а именно 5, 10, 15, 30, 60 минут. Такая продолжительность считается

приемлемой с практической точки зрения. В генетическом алгоритме использовались турнирная селекция; односточный кроссинговер с вероятностью 0,9; односточный оператор мутации с вероятностью 0,1. На шаге локального улучшения в алгоритме генетического локального поиска использовалась окрестность N_1 .

На рис. 1 и 2 на горизонтальной оси указаны тестовые примеры, по вертикальной оси отражено количество потерянных пакетов.

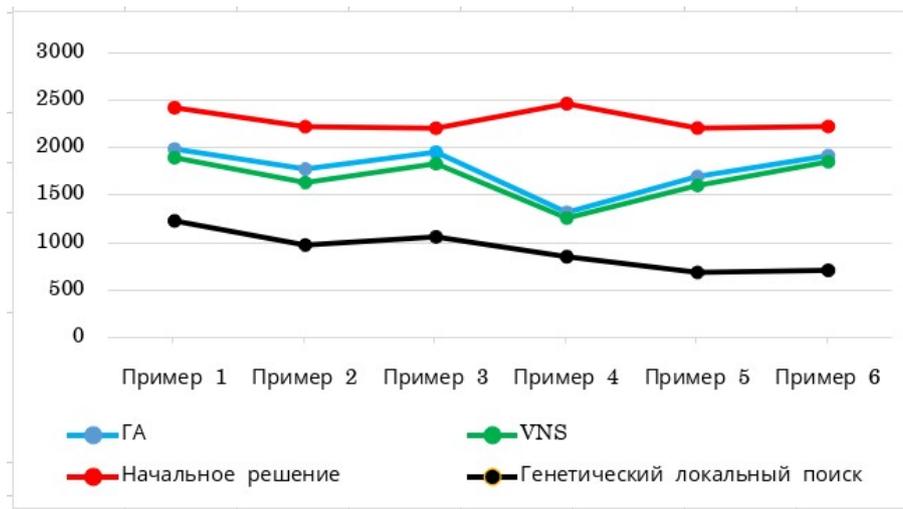
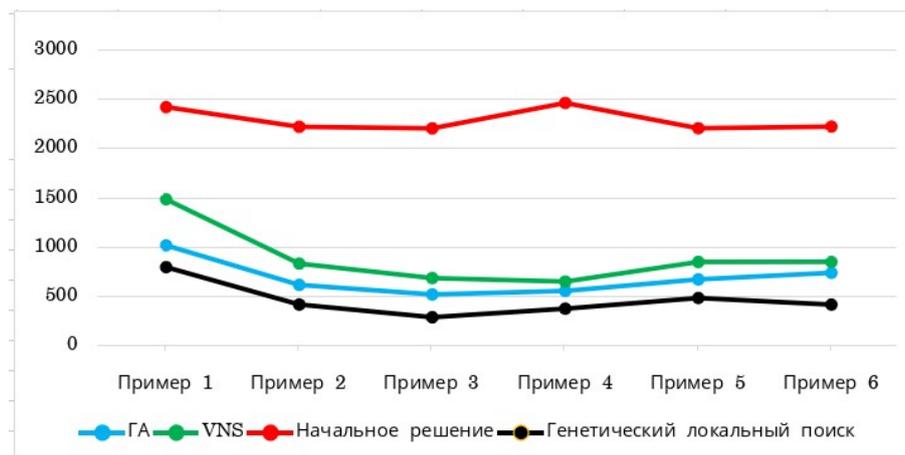


Рис. 1. Среднее количество потерянных пакетов, $t = 15$ мин

В течение первых 5–10 минут тестирования все алгоритмы продемонстрировали примерно одинаковые результаты. Однако генетический локальный поиск несколько выделился за счёт снижения количества потерянных пакетов на 11 % в течение этого времени (см. рис. 1). Изменения начинаются через 15 минут, генетический локальный поиск демонстрирует наименьшее количество потерянных пакетов. По прошествии 60 минут тестирования алгоритмов были получены следующие результаты: генетический локальный поиск увеличил показатели на 85 % в сравнении с генетическим алгоритмом, уменьшившим количество потерянных пакетов на 70 %, и алгоритмом VNS, который показал уменьшение потерь на 60 % (рис. 2).

Заключение

В работе предложены возможные способы решения задачи размещения наземных станций для проектирования глобальной спутниковой сети связи. С этой целью построены проблемно-ориентированные варианты генетического алгоритма и алгоритма генетического локального поиска. Проведено их экспериментальное исследование на примерах, сформированных по аналогии с реальными данными. В результате исследования было установлено, что генетический локальный поиск обеспечивает наименьшее количество потерянных пакетов. Он позволил снизить количество потерь на 85 %, что является значительным улучшением. Генетический алгоритм и локальный поиск с чередующимися окрестностями несколько уступили

Рис. 2. Среднее количество потерянных пакетов, $t = 60$ мин

этим результатам, уменьшив количество потерянных пакетов по сравнению с начальным на 70 и 60 % соответственно. Проведённое исследование имеет практическую значимость для спутниковых операторов и системных инженеров, предоставляющих услуги связи через глобальные спутниковые сети связи. Разработки могут быть использованы в дальнейшем для оптимизации работы указанных сетей связи.

Благодарности

Благодарим А.В. Еремеева и П.А. Борисовского за полезные консультации. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ, № 21-41-09017.

Литература

1. Xu S., Wang X.W., Huang M. Software defined next-generation satellite networks: Architecture, challenges, and solutions // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 4027–4041.
2. Tang Z., Zhao B., Yu W., Feng Z., Wu C. Software defined satellite networks: Benefits and challenges // 2014 IEEE Computers, Communications and IT Applications Conference. 2014. P. 127–132.
3. Borisovsky P., Eremeev A., Hrushev S., Teplyakov V., Vorozhtsov M. On three approaches to length-bounded maximum multicommodity flow with unit edge-lengths // Yugoslav Journal of Operations Research. 2019. Vol. 29, No. 1. P. 93–112.
4. Borisovsky P., Eremeev A., Hrushev S., Teplyakov V. Experimental evaluation of algorithms for packet routing in software defined network // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Iss. 10. P. 584–589.
5. Колоколов А.А., Леванова Т.В., Позняков Ю.С. Алгоритмы искусственной иммунной системы для вариантной задачи размещения телекоммуникационных центров // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2013. Т. 6, № 1. С. 35–44.
6. Levanova T., Gnusarev A. Development of threshold algorithms for a location problem with elastic demand // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 10665 LNCS. P. 382–389.

7. Борисовский П.А. Генетические алгоритмы для задачи о поставках продукции // Динамика систем, механизмов и машин: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. Кн. 2. С. 255–258.
8. Борисовский П.А., Еремеев А.В. Генетический алгоритм для задачи о вершинном покрытии графа // Математика и информатика: наука и образование: межвуз. сб. науч. тр. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2008. Вып. 7. С. 49–54.
9. Eremeev A.V. Hitting times of local and global optima in genetic algorithms with very high selection pressure // Yugoslav Journal of Operations Research. 2017. Vol. 27, Iss. 3. P. 323–339.
10. Reeves C., Rowe J. Genetic algorithms – principles and perspectives. A guide to GA theory. Kluwer Academic Publishers, 2003.
11. Blum C., Eremeev A., Zakharova Y. Hybridizations of evolutionary algorithms with Large Neighborhood Search // Computer Science Review. 2022. Vol. 46. Art. 100512.
12. Eremeev A.V., Kovalenko Y.V. A memetic algorithm with optimal recombination for the asymmetric travelling salesman problem // Memetic Computing. 2020. Vol. 12. P. 23–36.
13. Кочетов Ю.А., Младенович Н., Хансен П. Локальный поиск с чередующимися окрестностями // Дискретн. анализ и исслед. опер. 2003. Т. 10, № 1. С. 11–43.
14. Леванова Т.В., Федоренко А.С. Локальный поиск с чередующимися окрестностями для двухстадийной задачи размещения // Дискретн. анализ и исслед. опер. 2008. Т. 15, № 3. С. 43–57.
15. Levanova T.V., Gnusarev A.Yu. Variable neighborhood search algorithms for a competitive location problem with elastic demand // Diskretn. Anal. Issled. Oper. 2020. Vol. 27, No. 4. P. 80–103; J. Appl. Industr. Math. 2020. Vol. 14, No. 4. H. 693–705.
16. Eremeev A., Gette A., Hrushev S., Levanova T. Location and Design of Ground Stations for Software Defined Satellite Networks // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russian Federation, 2022. P. 1–4.

GENETIC ALGORITHMS FOR THE LOCATION OF GROUND STATIONS FOR A GLOBAL SATELLITE COMMUNICATIONS NETWORK

T.V. Levanova^{1,2}

Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, e-mail: levanovat@gmail.com

A.V. Gette²

Ph.D. Student, e-mail: gette4aleks@yandex.ru

¹Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

²Sobolev Institute of Mathematics of SB RAS, Omsk Division, Omsk, Russia

Abstract. Global satellite networks provide communication in various parts of the Earth. To ensure communication in large areas, it is necessary to locate ground stations that interact with satellite systems. The solution to the problem of location and design of ground stations can be divided into two stages. At the first stage, a set of ground stations under construction and the configuration of their equipment are determined. At the second stage, data packet routes are regularly calculated in each time interval, taking into account requests from customers and the current state of the communication network. The quality of customer service in a time interval is measured as the average number of lost or unrouted packets per unit of time. Previously, when solving the routing problem, it was assumed that all stations and transmitting devices

had already been selected. In this paper, the problem is considered as a two-stage one, in which it is necessary to solve the issues of the first and second stages together. The criterion is to minimize the total number of lost packets. To do this, a genetic algorithm and a genetic local search algorithm were built, their experimental study was performed, and a comparison with other algorithms was carried out.

Keywords: routing problem, location, genetic algorithm, local search, software defined network.

Дата поступления в редакцию: 18.02.2024