

УДК 004.72

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.60.9.009](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.60.9.009)

Параметрический синтез плана распределения частотных диапазонов эвристическими поисковыми алгоритмами

В.В. Становов¹, Д.А. Тауснев¹, Э.В. Морозов¹, С.М. Горбунов², К.Э. Гаипов¹

¹*Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация*

Резюме. Развитие спутниковых телекоммуникационных систем приводит к необходимости решения задач распределения частотных диапазонов для используемых каналов связи, с учетом требований по пропускной способности сети. При этом необходимо учитывать неравномерность распределения трафика, а также зависимость пропускной способности от используемых частотных диапазонов. Требования к качеству обслуживания создают необходимость динамической настройки параметров сети, причем не только перераспределения потоков в ней, но и перераспределения доступных частотных диапазонов, а также переопределения их количества. Цель данного исследования – разработать алгоритмы синтеза плана распределения частотных диапазонов с учетом целевых запросов и структуры телекоммуникационной сети. Для этого реализован алгоритм определения минимального количества различных каналов связи путем раскраски графа, при этом определение потоков на ребрах графа определяется при помощи жадного градиентного алгоритма, оптимизирующего время задержки и коэффициент пропускной способности. Кроме этого, реализован генетический алгоритм для тонкой подстройки полученного изначального плана распределения частот. Проведенные вычислительные эксперименты показали способность разработанного алгоритма находить решения для сетей размерностью до 1000 узлов за приемлемое время. Для сетей небольшой размерности показано, что генетический алгоритм способен улучшать найденные решения с точки зрения пропускной способности сети.

Ключевые слова: гетерогенные сети связи, распределение информационных потоков, динамическая маршрутизация, жадные алгоритмы, генетические алгоритмы.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда НТИ в рамках Договора №70-2025-000804 от 26.05.2025.

Для цитирования: Становов В.В., Тауснев Д.А., Морозов Э.В., Горбунов С.М., Гаипов К.Э. Параметрический синтез плана распределения частотных диапазонов эвристическими поисковыми алгоритмами. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(9). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2520> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.60.9.009

Parametric synthesis of the frequency ranges distribution plan using heuristic search algorithms

V.V. Stanovov¹, D.A. Tausnev¹, E.V. Morozov¹, S.M. Gorbunov², K.E. Gaipov¹

¹*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation*

Abstract. The development of the telecommunication systems leads to the need of solving frequencies ranges distribution problems for the used communication channels, considering the network throughput. The non-even distribution of the traffic, as well as the dependence of the throughput on the used frequency ranges should be considered. The requirements to the quality of service require dynamic

tuning of the network parameters, and not only the redistribution of data flows in it, but also the redistribution of available frequency ranges, as well as their number. The aim of this study is to develop the algorithms of frequency ranges distribution synthesis, considering the target requests and the structure of the telecommunication network. For this an algorithm for determining the minimum number of different communication channels is implemented, which works by coloring the graph, and the flows on the edges of the graph are determined using greedy gradient algorithm, which optimizes the delay time and throughput coefficient. Moreover, the genetic algorithm for fine-tuning the initially designed frequency distribution plan is implemented. The performed computational experiments have shown the ability of the developed algorithm to find solutions for networks with up to 1000 nodes at a reasonable time. For networks of small dimension it is shown, that the genetic algorithm is able to improve the found solutions in terms of network throughput.

Keywords: heterogeneous communication networks, distribution of information flows, dynamic routing, greedy algorithms, genetic algorithms.

Acknowledgements: The research has been performed with the financial support of the NTI Fund under contract №70-2025-000804 from 26.05.2025.

For citation: Stanovov V.V., Tausnev D.A., Morozov E.V., Gorbunov S.M., Gaipov K.E. Parametric synthesis of the frequency ranges distribution plan using heuristic search algorithms. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(9). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/journal/article?id=2520> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.60.9.009

Введение

Задача о распределении частотных диапазонов в сетях беспроводной связи является одной из ключевых, так как ширина полос пропускания напрямую влияет на количество информации, которое может быть передано по определенному каналу. В современном мире значительная часть электромагнитного спектра зарезервирована под те или иные задачи, и использование конкретных диапазонов регулируется государством. Для задач космической связи существуют известные полосы частот, в которых разрешена передача данных, однако эти диапазоны ограничены, что диктует необходимость их эффективного использования с целью максимизации пропускной способности.

Эффективное использование каналов связи между парой космических аппаратов (КА), между космическим аппаратом и высотной стратосферной платформой (ВСП), а также между ними и наземными станциями и абонентами требует использование динамической маршрутизации трафика в ответ на изменение топологии сети [1, 2]. Задача маршрутизации трафика сама по себе является нетривиальной, так как в ней должны учитываться все элементы сетевой инфраструктуры, а также их запросы, причем алгоритм маршрутизации должен обрабатывать быстрее, чем происходят существенные изменения в топологии сети. Как правило, критерием оптимальности в таких задачах выступает либо суммарное среднее время задержки T , либо коэффициент пропускной способности сети K [3].

Использование фиксированных пропускных способностей каналов связи между узлами не отражает реальное положение дел, так как на практике между любой парой узлов для передачи данных используется конкретный частотный диапазон. Следовательно, распределение этих частотных диапазонов влияет на то, какое решение может быть найдено алгоритмом маршрутизации трафика. То есть, задача динамического планирования распределения трафика подразумевает не только определение того, какой пакет данных по какому маршруту отправить, но и какие пропускные способности должны быть в каждом из каналов. Таким образом, рассматриваемая задача является двухуровневой – сначала необходимо определить

используемые частотные диапазоны, на их основании рассчитать пропускные способности, а с их помощью определить наилучшие маршруты. Кроме того, количество различных частотных диапазонов во всей телекоммуникационной сети следует минимизировать, так как их большое количество усложняет маршрутизацию и делает каждый из каналов более узким.

Отдельно задача маршрутизации при заданных пропускных способностях рассматривалась в литературе ранее, например, в известном алгоритме Йена [4]. Однако недостатком этого алгоритма является необходимость нахождения всех пар маршрутов без петель между всеми парами «источников» и «пунктов назначения», что приводит к быстрому усложнению задачи оптимизации из-за увеличения числа переменных состояния при поиске оптимального решения. В некоторых других алгоритмах, например [5, 6] выбираются те маршруты, которые удовлетворяют заранее заданным критериям, зависящим от характеристик канала. Другой подход к выбору маршрута заключается в поиске маршрутов, не имеющих общих ребер или имеющих минимальное количество общих ребер [7].

Критерием оптимальности в [5] является общее время задержки, обусловленное задержками в буфере интерфейса сетевого устройства. На основе найденных маршрутов информационных потоков определяется общий поток по каждому каналу связи. Затем, используя уравнение времени задержки для системы очередей $M/M/1$, можно оценить целевую функцию как суммарное время задержки во всех каналах. Данный подход с различными модификациями используется во многих работах, где в качестве критерия оптимальности выбирается определенная функция затрат, зависящая от общего потока [8], что приводит к задачам линейного и нелинейного программирования. Такие подходы применимы если потери информации отсутствуют или когда ими можно пренебречь, поскольку в таких случаях можно получить целевую функцию в явном виде с линейным набором ограничений-неравенств. Альтернативой математическим моделям, основанным на маршрутах, являются математические модели, основанные на потоках в каналах связи [9], которые, начиная с определенной плотности графа, имеют меньшую размерность (меньшее количество переменных состояния), чем модели, основанные на маршрутах. Концепции, наиболее близкие к алгоритму, предлагаемому в данной работе, были представлены в [10], где рассматриваются потери ячеек в сети АТМ.

Целью данной работы является разработка алгоритма определения минимально возможного количества частотных диапазонов, а также ширины каждого из них с помощью эвристических алгоритмов с целью оптимизации передачи данных в телекоммуникационной сети с точки зрения критериев суммарного среднего времени задержки и коэффициента пропускной способности.

В данной работе на этапе маршрутизации используется ранее предложенный эвристический жадно-градиентный алгоритм (ЖГА) [11], схожий с алгоритмом Каракостаса [12], который способен оптимизировать как время задержки, так и коэффициент загрузки сети. В свою очередь для определения количества частотных диапазонов используется эвристический алгоритм, основанный на раскраске графа, а для определения ширины каждого диапазона предлагается применять алгоритм, использующий предполагаемую загрузку каналов. Кроме этого, предложен метод улучшения синтезированных субоптимальных планов распределения частотных диапазонов за счет применения бинарного генетического алгоритма [13].

Для описания предлагаемых алгоритмов в следующем разделе данной статьи приведена формальная постановка задачи.

Материалы и методы

Пусть имеется конечное число КА и ВСП, объединенных в телекоммуникационную сеть. Причем известно наличие возможности передавать информацию между каждой парой КА/ВСП (далее – узлов сети). Будем рассматривать граф связей между узлами. Введем обозначения:

1. n – количество узлов телекоммуникационной сети;
2. $s_{i,j}$ – матрица смежности графа, т. е. наличие связи между i -м и j -м узлом, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, s_{i,j} \in \{0, 1\}$;
3. Y – количество целевых запросов, т. е. запросов на передачу информации между узлами;
4. ρ – среднее количество связей для каждого узла;
5. g_k – целевой запрос из узла $start_k$ в узел $finish_k$ с требуемой скоростью передачи данных (интенсивностью информационного потока) $Q_k, k = 1, 2, \dots, Y$;
6. F_0 – нижняя граничная частота диапазона, используемого для передачи данных;
7. F_1 – верхняя граничная частота диапазона, используемого для передачи данных;
8. $FT(F_l, F_u)$ – функциональная зависимость пропускной способности канала связи от заданного диапазона частот между F_l и F_u ;
9. $Pl(k)$ – функциональная зависимость вероятности потерь по каналу связи при доле загрузки канала k ;
10. $Td(x, k, b)$ – функциональная зависимость времени задержки по каналу связи при доле загрузки канала k , интенсивности потока x и размере буфера b ;
11. Pl_{max} – максимальная вероятность потерь;
12. Td_{max} – максимальное время задержки;
13. $r_{i,j}$ – матрица пропускных способностей между узлами сети, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$;
14. $x_{i,j}$ – матрица интенсивностей информационных потоков между узлами сети, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$;
15. $k_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{r_{i,j}}$ – доля загрузки канала между узлами сети, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$;
16. H – количество используемых каналов связи;
17. Ch_v – пропускная способность v -го канала связи, соответствующего частотному диапазону $F_l^v, F_u^v, v = 1, 2, \dots, H$;
18. Os_v – очередность каналов в соответствии с пропускными способностями, $v = 1, 2, \dots, H$;
19. K – пропускная способность всей сети, т. е. множитель, на который можно увеличить загрузку $x_{i,j}$ каждого канала так, чтобы $K \cdot x_{i,j} < 0,98r_{i,j}$;
20. S – количество активных связей, $S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{i,j}$;
21. χ_g – список сохраненных интенсивностей связей, $g = 1, 2, \dots, S$;
22. d_g – список индексов интенсивностей связей, $g = 1, 2, \dots, S$;
23. $R_{i,j}$ – матрица раскраски графа, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, R_{i,j} = 0$ означает отсутствие цвета;
24. $C_{i,j,v}$ – план распределения каналов, где $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, v = 1, 2, \dots, H, C_{i,j,v} \in \{0, 1\}$;
25. TB_v – суммарные пропускные способности для каждого из цветов, $v = 1, 2, \dots, H$.

Требуется по заданной матрице смежности графа и целевым запросам определить план распределения частотных диапазонов между каждой парой узлов, при этом учитывая, что:

1. Если i -й узел использует o -й канал для отправки информации j -му узлу, то он не может использовать тот же канал для связи с другим узлом (далее – условие № 1);
2. Если i -й узел получает информацию по o -му каналу связи от j -го узла, то он не может использовать этот же канал для отправки информации обратно j -му узлу (далее – условие № 2).

Учитывая эти ограничения, необходимо распределить частотные диапазоны с целью минимизации вероятности потерь и времени задержки. При этом необходимо использовать наименьшее количество каналов связи, учитывая заданные частотные диапазоны и соответствующие пропускные способности каждого из доступных радиочастотных каналов.

Упомянутая функциональная зависимость времени задержки, использованная в ЖГА, описывается следующим образом:

$$Td(x, k, b) = \frac{k_{i,j}^2(1-k_{i,j}^{b-1}(b-(b-1)k_{i,j}))}{x_{i,j}(1-k_{i,j})(1-k_{i,j}^b)}.$$

В свою очередь вероятность потерь задавалась следующей формулой:

$$Pl(k) = \begin{cases} 0, & \text{если } k_{i,j} < 0,98 \\ 1, & \text{если } k_{i,j} \geq 0,98 \end{cases}.$$

Иными словами, если загрузка канала меньше 98 %, то вероятность потерь считалась допустимой, в противном случае – недопустимой. Данное упрощение основано на результатах симуляционного моделирования сетей, где допустимый порог вероятности потерь нарушался при загрузке более 98 %.

Алгоритм параметрического синтеза плана распределения частот. Предположим, что известны упомянутые в предыдущем разделе параметры, не считая пропускных способностей $r_{i,j}$, интенсивностей $x_{i,j}$, и количества каналов N . Разработанный алгоритм определения N требует, чтобы была известна загруженность связей между узлами. Для ее определения с целью минимизации времени задержки T используется жадный градиентный алгоритм, разработанный ранее [11]. Последовательность шагов выглядит следующим образом:

1. Положить план распределения каналов нулевым: $C_{i,j,v} = 0 \forall i, j, v$.
2. Задать пропускные способности всех каналов равными бесконечности, т. е. $r_{i,j} = \infty$.
3. Запустить ЖГА с целью минимизации времени задержки.
4. Получить матрицу загруженностей $x_{i,j}$.
5. Назначить каждой активной связи номер $d_g = g$, $g = 1, 2, \dots, S$.
6. Записать интенсивности $\chi_g = x_{i,j}$, при этом $g = g + 1$ если $s_{i,j} = 1$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, n$.
7. Отсортировать записанные интенсивности χ_g по убыванию, переставляя соответствующие им индексы d_g .
8. Использовать алгоритм раскраски графа по матрице смежности $s_{i,j}$ минимальным количеством цветов H , начиная со связи с максимальной интенсивностью χ_1 и соответствующего ей номера d_1 , и далее проверяя условия добавления нового цвета поочередно в соответствии с χ_g и d_g , в итоге получив число цветов H , а также матрицу цветов $R_{i,j}$.

9. Частотный диапазон между F_l и F_u разбить на H непересекающихся интервалов, соответствующих каналам связи (ширина каждого канала определяется отдельным алгоритмом, см. пункт 5).

10. Определить пропускную способность каждого из каналов, используя известную функциональную зависимость $Ch_v = FT(F_l^v, F_u^v)$.

11. Определить соответствие между цветами и номерами каналов, присваивая цвет первый цвет наиболее широкому каналу и далее по убыванию, для этого задать $Os_v = v, v = 1, 2, \dots, H$, и отсортировать по убыванию Ch_v , переставляя индексы Os_v .

12. Задать активные каналы, используя распределение цветов $R_{i,j}$, и порядок каналов Os_v , таким образом $C_{i,j,Os_{R_{i,j}}} = 1$.

13. Рассчитать пропускные способности каждой связи в соответствии с номерами каналов, т. е. $r_{i,j} = \sum_{v=1}^H C_{i,j,v} \cdot Ch_v$.

14. Запустить ЖГА с целью максимизации коэффициента пропускной способности всей сети K .

Шаг 7, на котором происходит раскраска графа, а также некоторые детали шагов 2, 8 и 13, требуют отдельных пояснений, приведенных ниже.

Алгоритм раскраски графа по матрице смежности. Задача определения минимального количества каналов, необходимых для обеспечения связности между узлами двунаправленного орграфа, заданного матрицей $s_{i,j}$, при наличии условий № 1 и № 2, сводится к задаче раскраски графа [14]. В общем случае эта задача является NP-сложной, и не имеет простого алгоритма решения. Однако существует относительно простой метод нахождения субоптимального решения, который и будет описан ниже. Отличие от классических алгоритмов заключается в том, что здесь задается специальный порядок назначения цветов, так как цвета с меньшим номером, соответствующие самым широким каналам, должны назначаться самым загруженным связям в матрице $x_{i,j}$.

Пусть задан порядок просмотра вершин графа d_g . Алгоритм раскраски приведен ниже:

1. Текущий цвет $color = 1$
2. Задать $R_{i,j} = 0 \forall i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$
3. Для всех $p = 1, 2, \dots, n$
 - 3.1. Для всех $m = 1, 2, \dots, n$
 - 3.1.1. $i = d_g \bmod n$
 - 3.1.2. $j = floor(\frac{d_g}{n})$
 - 3.1.3. Если $s_{i,j} = 1$
 - 3.1.3.1. $clr = 1$
 - 3.1.3.2. Выполнять
 - 3.1.3.2.1. $rc = 0$
 - 3.1.3.2.2. Для $k = 1, 2, \dots, n$
 - 3.1.3.2.2.1. $rc = rc + 1$ если $clr = R_{i,k}$
 - 3.1.3.2.3. $cc = 0$
 - 3.1.3.2.4. Для $k = 1, 2, \dots, n$
 - 3.1.3.2.4.1. $rc = rc + 1$ если $clr = R_{k,j}$
 - 3.1.3.2.5. Если $rc = 0$ и $cc = 0$ и $R_{i,j} \neq clr$
 - 3.1.3.2.5.1. $color = clr$
 - 3.1.3.2.5.2. Стоп
 - 3.1.3.2.6. $clr = clr + 1$
 - 3.1.3.3. $R_{i,j} = color$

$$3.1.4. \quad g = g + 1$$

4. Вернуть $color, R$

Первое возвращаемое значение используется в качестве минимального количества цветов, т. е. $H = color$.

Модификация жадного градиентного алгоритма для определения сходимости. Для ускорения работы ЖГА реализован метод определения сходимости на основе скользящего среднего. Так как в ходе поиска максимальной пропускной способности всей сети, т. е. параметра K , величина этого параметра может колебаться, то необходим метод определения момента достижения сходимости. В частности, разработанный метод выполняет следующие шаги:

1. Положить $K_R = 0, \alpha = 0,05, NS = 25, \beta = 0,01, NC = 0$
2. На каждом шаге ЖГА
 - 2.1. Выполнить шаг алгоритма, рассчитать K
 - 2.2. $K_R = K_R \cdot (1 - \alpha) + \alpha \cdot K$
 - 2.3. Если $|K_R - K| < \beta \cdot K_R$
 - 2.3.1. $NC = NC + 1$
 - 2.4. Иначе
 - 2.4.1. $NC = 0$
 - 2.5. Если $NC = NS$
 - 2.5.1. Стоп
3. Вернуть K

Иными словами, если на протяжении 25 последовательных шагов ЖГА отличие K от скользящего среднего K_R , рассчитанного с коэффициентом α , находится в диапазоне $\beta = 1\%$ от текущего значения K_R , то можно считать, что алгоритм сошелся.

Алгоритм определения ширины каждого канала. Ширина каждого канала на шаге 8 в алгоритме синтеза плана распределения частот может быть определена несколькими способами. Простейший из них – задать диапазоны частот равной длины, т. е. $F_l^v = \frac{m}{H} \cdot (F_u - F_l)$, $F_u^v = \frac{m+1}{H} \cdot (F_u - F_l)$, $m = 0, 1, \dots, H - 1$. Несколько более сложный метод – задать частоты F_l^v, F_u^v таким образом, чтобы все каналы имели равную пропускную способность $Ch_v = FT(F_l^v, F_u^v)$, однако в этом случае задача распределения номеров каналов теряет смысл. Задача поиска наилучшего разбиения диапазона на частоты может быть сформулирована как задача оптимизации с критерием качества K , рассчитываемым при помощи ЖГА.

Однако существует простой эвристический способ распределить частоты в соответствии с тем распределением трафика, которое было получено на первом запуске ЖГА. Для этого рассчитаем суммарные пропускные способности для каждого из цветов TB_v следующим алгоритмом:

1. Положить $TB_v = 0, v = 1, 2, \dots, H$
2. Для всех $i = 1, 2, \dots, n$
 - 2.1. Для всех $j = 1, 2, \dots, n$
 - 2.1.1. Если $s_{i,j} = 1$
3. $TB_{R_{i,j}} = TB_{R_{i,j}} + x_{i,j}$
4. Вернуть TB

Далее величины TB используются для назначения пропускных способностей каналов, в частности, $Ch_v = \frac{TB_v}{\sum_{p=0}^H TB_p} \cdot FT(F_l, F_u)$, то есть каждому каналу назначается пропускная способность, пропорциональная величине TB_v . Далее значения Ch_v

используются для определения частот с помощью известной функциональной зависимости.

Следует отметить, что в данной постановке явный вид функциональной зависимости $FT(F_l, F_u)$ нас не интересует, и важна лишь возможность переводить требуемую долю пропускной способности в диапазон частот. Единственным требованием к $FT(F_l, F_u)$ является монотонность этой зависимости, но на практике она выполняется в силу физических принципов – чем больше частота и диапазон, тем больше информации можно передать за единицу времени.

Уточнение полученного решения с помощью генетического алгоритма. Так как полученное в результате выполнения предыдущих шагов решение может быть неоптимальным с точки зрения распределения номеров каналов по связям в сети, то для улучшения этого решения можно использовать поисковый алгоритм псевдоболевой оптимизации, например, бинарный генетический алгоритм. При этом одним индивидом-решением будет являться один план распределения частот, т. е. трехмерный тензор $C_{i,j,v}$.

Инициализация начальной популяции происходит следующим образом. Первый индивид в популяции $Pop_{p,i,j,k}$ с номером $p = 1$ устанавливается равным сгенерированному на предыдущем этапе распределению частот. Остальные индивиды задаются случайным образом, при этом для каждой связи устанавливается лишь один канал, так чтобы $Pop_{p,i,j,k} = 1$ для $k = k_{active}$ и $Pop_{p,i,j,k} = 0$ для $k \neq k_{active}$, при $k_{active} = rand(1, H)$. Размер популяции задается равным NP .

После инициализации следует расчет пригодности решений. Если какой-то из индивидов нарушает ограничения задачи, т. е. использует недопустимое распределение каналов (условия № 1 и № 2), то решение считается недопустимым, и для него ЖГА не запускается, чтобы не тратить дополнительные вычислительные ресурсы. Для таких решений значением критерия качества является число раз, когда были нарушены условия № 1 и № 2. Если же решение допустимое, то его качеством считается значение K , то есть общая пропускная способность сети. Иными словами, данная задача рассматривается как задача условной оптимизации.

После расчета пригодностей начинается основной цикл алгоритма, который состоит из последовательного применения следующих шагов:

1. Турнирная селекция для выбора родителей для скрещивания.
2. Скрещивание двух индивидов с вероятностью Cr .
3. Мутация индивида одним из трёх способов с вероятностью Mr .

После мутации сгенерированные решения сохраняются в промежуточную популяцию и оцениваются. После этого начальная популяция объединяется с промежуточной, сортируется по пригодности, и лучшие NP индивидов записываются в начальную популяцию. После этого цикл, включающий селекцию, скрещивание и мутацию повторяется.

Так как здесь решается задача условной оптимизации, следует отдельно рассмотреть механизм сравнения индивидов между собой. На этапе турнирной селекции случайно выбирается сначала один индивид, далее второй, и происходит сравнение. При этом используется принцип превосходства допустимых решений:

1. Среди двух недопустимых индивидов выбирается тот, который нарушает меньше.
2. Среди двух допустимых индивидов выбирается тот, у которого лучше пропускная способность сети.
3. Если одно решение допустимо, а другое – нет, то выбирается допустимое решение.

После турнирной селекции остается выбранным индивид с номером $r1$. Он скрещивается с текущим индивидом с индексом p , при этом вероятность скрещивания устанавливается равной $Cr = 0,3$, то есть с вероятностью 0,3 бит будет взят от индивида $r1$, иначе от текущего индивида p .

После скрещивания применяется мутация с вероятностью $Mr = \frac{1}{S}$. Если связь активна, то случайно выбирается один из трех типов мутации:

1. Инвертирование гена: $Pop_{p,i,j,k} = 1$.
2. Смена номера канала: $Pop_{p,i,j,h1} = Pop_{p,i,j,h2}$, $Pop_{p,i,j,h2} = Pop_{p,i,j,h1}$, $h1 = rand(1, H)$, $h2 = rand(1, H)$.
3. Инверсия направления канала: $Pop_{p,i,j,h1} = Pop_{p,i,j,h2}$, $Pop_{p,j,i,h1} = Pop_{p,j,i,h2}$, $h1 = rand(1, H)$, $h2 = rand(1, H)$.

После мутации происходит расчет пригодности и формирование нового поколения. Следует отметить, что запуск генетического алгоритма является затратной процедурой с точки зрения вычислительной сложности и времени работы, и потому есть смысл использовать его только для относительно небольших сетей.

Результаты

Разработанные алгоритмы были реализованы в виде программной системы и протестированы на сетях различной топологии. Программа написана на языке C++ стандарта C++11 и скомпилирована с помощью GCC 13.3.0 на компьютере под управлением операционной системы Kubuntu 24.04.

После запуска программа генерирует задачу с заданными параметрами, и запускает алгоритм синтеза плана распределения частот. При необходимости есть возможность вручную задать матрицу смежности набор целевых запросов, однако для целей тестирования использовался генератор задач.

Ниже приведены результаты одного из запусков алгоритма на малой сети с 10 узлами. Малая размерность задачи здесь используется для того, чтобы подробно показать все этапы работы программной системы, т. е. приведены все результаты основных шагов.

Параметры для генерации задачи:

1. Количество узлов сети: 10
2. Количество целевых запросов: 20
3. Среднее количество соседних узлов для каждого из них: 3
4. Максимум количества информации в каждом запросе: 50

В Таблице 1 приведена сгенерированная матрица смежности.

Таблица 1 – Матрица смежности

Table 1 – Adjacency matrix

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
Узел 1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
Узел 2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Узел 3	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
Узел 4	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Узел 5	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
Узел 6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Узел 7	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
Узел 8	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
Узел 9	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Узел 10	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Общее количество связей в Таблице 1 равно 38. По этой матрице и с учетом целевых запросов запускается жадный градиентный алгоритм с целью минимизации времени задержки, причем пропускные способности каждого канала связи не учитываются. В Таблице 2 приведены рассчитанные интенсивности передачи информации между каждой парой узлов.

Таблица 2 – Интенсивности после запуска ЖГА
Table 2 – Intensities after GGA launch

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
Узел 1	0	24,5574	0	0	0	23,3843	37,4638	0	52,959	0
Узел 2	21,959	0	0	0	0	5,80461	55,7726	0	0	0
Узел 3	0	0	0	47,8046	42,0958	100	0	36,9042	0	0
Узел 4	0	0	0	0	7,68443	0	0	2,31557	0	0
Узел 5	0	0	48	0	0	0	49,7802	0	0	0
Узел 6	81,4638	26,5362	23,189	0	0	0	0	0	0	0
Узел 7	0	48,4426	0	0	31	0	0	17,8218	19,041	20
Узел 8	0	0	52,6157	3,19539	0	0	55,2198	0	0	0
Узел 9	41,9417	0	0	0	0	0	18,069	0	0	17,9893
Узел 10	0	0	0	0	0	0	0	17,9893	0	0

Рассчитанные и показанные в Таблице 2 интенсивности далее сортируются, и получается следующий набор значений: 100; 81,4638; 55,7726; 55,2198; 52,959; 52,6157; 49,7802; 48,4426; 48; 47,8046; 42,0958; 41,9417; 37,4638; 36,9042; 31; 26,5362; 24,5574; 23,3843; 23,189; 21,959; 20; 19,041; 18,069; 17,9893; 17,9893; 17,8218; 7,68443; 5,80461; 3,19539; 2,31557. Нулевые интенсивности здесь опущены.

На основании этих значений запускается алгоритм раскраски графа. В частности, он определяет порядок раскраски вершин, которые пронумерованы от 1 до 100. В частности, здесь порядок раскраски следующий: 25, 50, 16, 76, 8, 72, 46, 61, 42, 23, 24, 80, 6, 27, 64, 51, 1, 5, 52, 10, 69, 68, 86, 89, 97, 67, 34, 15, 73, 37, 71, 62, 60, 59, 63, 70, 66, 65, 74, 92, 93, 91, 88, 90, 98, 99, 96, 94, 95, 79, 81, 78, 75, 77, 85, 87, 84, 82, 83, 20, 21, 19, 17, 18, 29, 30, 28, 22, 26, 4, 7, 3, 0, 2, 13, 14, 12, 9, 11, 31, 49, 53, 48, 45, 47, 57, 58, 56, 54, 55, 36, 38, 35, 32, 33, 43, 44, 41, 39, 40

В результате работы алгоритма раскраски определено, что достаточно использовать всего 7 различных цветов для того, чтобы удовлетворить условиям 1 и 2. В Таблице 3 показана найденная раскраска графа.

Таблица 3 – Матрица номеров цветов
Table 3 – Color numbers matrix

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
Узел 1		3				1	6		2	
Узел 2	5					3	2			
Узел 3				3	2	4		1		
Узел 4			2		1			3		
Узел 5			3	2			1	4		
Узел 6	2	4	1							
Узел 7	4	1			3			2	5	6
Узел 8			4	6	7		5			1
Узел 9	1						4			2
Узел 10							3	5	1	

При этом по семи цветам получены следующие пропускные способности:

1. 409,79
2. 272,478
3. 163,567
4. 122,402
5. 60,4481
6. 2,31557
7. 0

Здесь следует отметить, что для 7-го цвета пропускная способность равна нулю, т. е. данный номер канала не используется по факту, однако он может быть активирован в случае применения генетического алгоритма. После применения нормировки окончательная ширина каналов получается следующая:

1. 397,468
2. 264,285
3. 158,649
4. 118,722
5. 58,6306
6. 2,24594
7. 0

Учитывая раскраску графа, приведенную в Таблице 3, можно записать матрицу активных каналов, которая показана в Таблице 4. Здесь последовательность нулей и единиц кодирует то, какой из каналов будет использоваться – в каждой такой последовательности активен только один канал.

Таблица 4 – Матрица активных каналов
Table 4 – Active channel matrix

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5
Узел 1	()	(0010000)	()	()	()
Узел 2	(0000100)	()	()	()	()
Узел 3	()	()	()	(0010000)	(0100000)
Узел 4	()	()	(0100000)	()	(1000000)
Узел 5	()	()	(0010000)	(0100000)	()
Узел 6	(0100000)	(0001000)	(1000000)	()	()
Узел 7	(0001000)	(1000000)	()	()	(0010000)
Узел 8	()	()	(0001000)	(0000010)	(0000001)
Узел 9	(1000000)	()	()	()	()
Узел 10	()	()	()	()	()
	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
Узел 1	(1000000)	(0000010)	()	(0100000)	()
Узел 2	(0010000)	(0100000)	()	()	()
Узел 3	(0001000)	()	(1000000)	()	()
Узел 4	()	()	(0010000)	()	()
Узел 5	()	(1000000)	(0001000)	()	()
Узел 6	()	()	()	()	()
Узел 7	()	()	(0100000)	(0000100)	(0000010)
Узел 8	()	(0000100)	()	()	(1000000)
Узел 9	()	(0001000)	()	()	(0100000)
Узел 10	()	(0010000)	(0000100)	(1000000)	()

Учитывая приведенные выше нормированные пропускные способности, можно записать матрицу рассчитанных пропускных способностей – она приведена в Таблице 5.

Таблица 5 – Матрица рассчитанных пропускных способностей
Table 5 – Matrix of calculated throughputs

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
Узел 1	0	158,649	0	0	0	397,468	2,24594	0	264,285	0
Узел 2	58,6306	0	0	0	0	158,649	264,285	0	0	0
Узел 3	0	0	0	158,649	264,285	118,722	0	397,468	0	0
Узел 4	0	0	264,285	0	397,468	0	0	158,649	0	0
Узел 5	0	0	158,649	264,285	0	0	397,468	118,722	0	0
Узел 6	264,285	118,722	397,468	0	0	0	0	0	0	0
Узел 7	118,722	397,468	0	0	158,649	0	0	264,285	58,6306	2,24594
Узел 8	0	0	118,722	2,24594	0	0	58,6306	0	0	397,468
Узел 9	397,468	0	0	0	0	0	118,722	0	0	264,285
Узел 10	0	0	0	0	0	0	158,649	58,6306	397,468	0

Таким образом, Таблица 5 содержит необходимую информацию для второго запуска ЖГА, то есть на этом этапе помимо матрицы смежности и целевых запросов, также известны и пропускные способности каждого канала. В Таблице 6 приведены результаты работы ЖГА, т. е. рассчитанные интенсивности как результат маршрутизации.

Таблица 6 – Интенсивности после второго запуска ЖГА
Table 6 – Intensities after second GGA launch

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
Узел 1	0	125,432	0	0	0	373,184	0	0	253,444	0
Узел 2	52,8499	0	0	0	0	149,438	256,186	0	0	0
Узел 3	0	0	0	151,232	256,372	114,645	0	311,44	0	0
Узел 4	0	0	2,14192	0	80,7041	0	0	1,40238	0	0
Узел 5	0	0	23,8321	97,2806	0	0	387,048	15,5458	0	0
Узел 6	247,961	106,431	290,888	0	0	0	0	0	0	0
Узел 7	105,573	290,714	0	0	118,521	0	0	58,4354	51,5664	0
Узел 8	0	0	104,162	0	0	0	55,386	0	0	389,519
Узел 9	373,722	0	0	0	0	0	102,823	0	0	71,0229
Узел 10	0	0	0	0	0	0	143,882	18,0117	218,519	0

В результате работы ЖГА итоговая пропускная способность сети 4,00644, то есть для сгенерированной задачи она в 4 раза превышает требования целевых запросов. Общее время работы всего алгоритма составило 0,003741 секунды.

Также рассматривалась зависимость времени работы от количества узлов и других параметров. Количество узлов существенно влияет на сложность задачи, время работы и требования к объему оперативной памяти. Количество целевых запросов для сгенерированных задач устанавливалось в 7–12 раз больше, чем количество узлов сети.

В Таблице 7 представлены результаты тестов с различными значениями параметров. Здесь T – время работы алгоритма в секундах, M – объем требуемой оперативной памяти, в мегабайтах.

Параметры оборудования для тестирования:

1. Центральный процессор: Intel Core i5 11400 H
2. Оперативная память: DDR4, 3200 МГц, 64 Гб

На Рисунке 1 показана зависимость времени работы и затрат памяти от количества узлов в сети.

Таблица 7 – Время расчетов и требования к памяти

Table 7 – Calculation time and memory requirements

n	Y	ρ	$FT(F_0, F_1)$	T, c	M, Mb
10	20	3	1000	0,004213	6,81640625
50	200	4	2000	0,215265	18,4453125
100	500	4	5000	1,110135	64,59765625
250	1000	5	10000	7,328821	322,6015625
500	2500	6	10000	23,481109	1746,488281
1000	5000	6	15000	133,043112	8825,167969
1500	7500	7	20000	216,550383	24103,63281

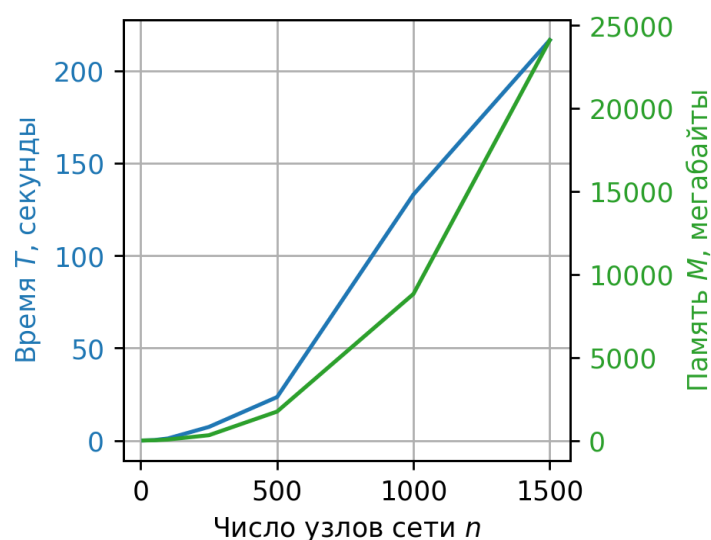


Рисунок 1 – Затраты времени и памяти в зависимости от количества узлов

Figure 1 – Time and memory requirements depending on the number of nodes

Как можно заметить, потребление оперативной памяти имеет квадратичную зависимость от количества узлов, при этом время работы также возрастает, но не так быстро.

Для тестирования генетического алгоритма была сгенерирована другая задача с 20 узлами и 150 целевыми запросами. Для задач размерности 10 использование ГА, как правило, не дает значительных улучшений, так как эвристический алгоритм генерации плана распределения частот находит решение, близкое к оптимальному. Для большего числа узлов применение ГА обосновано, так как возникают возможности повторного использования некоторых каналов на некоторых связях, без нарушения условий 1 и 2. Для сгенерированной задачи было определено, что необходимо 8 цветов (8 различных каналов), при этом пропускная способность сети после второго запуска ЖГА составила $K = 0,690362$. Генетический алгоритм запускался со следующими параметрами:

Число индивидов: 100

Число поколений: 100

График изменения лучшей пригодности (величина K) показан на Рисунке 2.

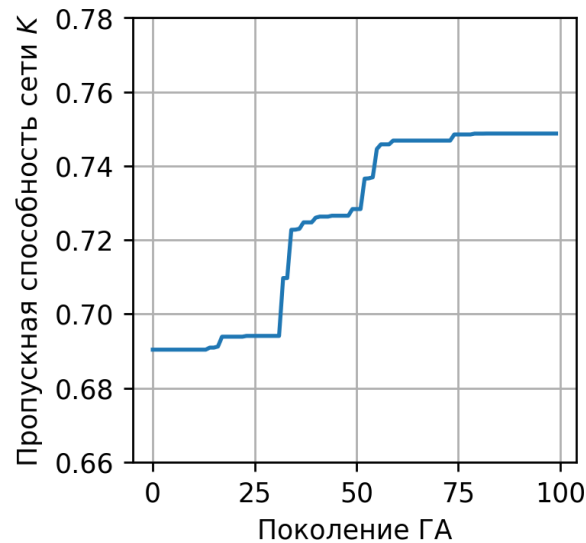


Рисунок 2 – Улучшение качества решения при использовании ГА
Figure 2 – Improvement of solution quality by using GA

Как можно видеть на Рисунке 2, с изначального значения около 0,69 генетический алгоритм смог улучшить решение до $K = 0,748731$, т. е. более чем на 8 %. Однако при этом время работы составило 88,24 секунды, так как для этого потребовалось 10000 запусков ЖГА.

Для задачи с 50 узлами запуск ГА занял 686,68 секунд, и позволил увеличить пропускную способность с 1,55767 до 1,62555, также при 100 индивидах и 100 поколениях. В обоих случаях эти улучшения достигались за счет переиспользования некоторых каналов, где это возможно, то есть вместо строки из нулей с одной единицей, как в Таблице 4, появлялись дополнительные единицы – это означало, что для пары узлов использовались сразу два канала связи. Таким образом, применение ГА может дополнительно повысить пропускную способность, однако его использование имеет смысл только тогда, когда позволяют временные ограничения.

Заключение

В данной работы было предложен подход, позволяющий решить задачу генерации плана распределения частотных диапазонов по заданной матрице связности телекоммуникационной сети с набором целевых запросов. При этом используемый алгоритм раскраски графа позволяет автоматически определить минимальное необходимое количество каналов, а эвристический алгоритм назначения пропускных способностей учитывает желаемое распределение информационных потоков. Также разработан генетический алгоритм, способный производить тонкую настройку сгенерированного плана и улучшать его ключевые показатели, в частности, пропускную способность сети. Следует, однако, отметить, что в данной работе не рассматривались конкретные частотные диапазоны, а рассматривались обобщенные постановки. Тем не менее, предложенные алгоритмы способны находить допустимые решения задачи планирования за приемлемое время на пользовательских компьютерах даже для сетей с тысячами узлов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

1. Учет распределения положений спутников, стратосферных аппаратов и наземных станций в топологии сети.

2. Создание более эффективных эвристических алгоритмов распределения частот, которые могли бы назначать несколько доступных каналов каждой связи.

3. Оптимизация разработанных алгоритмов для работы в реальном времени с учетом динамических изменений топологии.

4. Параллельная реализация генетического алгоритма с независимой оценкой нескольких решений для ускорения расчетов для больших сетей.

Разработанный комплекс решений представляет практическую ценность для проектирования и эксплуатации современных телекоммуникационных систем и может быть использован в различных областях, включая спутниковую связь, интернет вещей и критически важные инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Yan D., Guo J., Wang L., Zhan P. SADR: Network status adaptive QoS dynamic routing for satellite networks. In: *2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing, 06–10 November 2016, Chengdu, China*. IEEE; 2016. P. 1186–1190. <https://doi.org/10.1109/ICSP.2016.7878015>
2. Kasan H., Kim J. The case for dynamic bias in global adaptive routing. *IEEE Computer Architecture Letters*. 2021;20(1):38–41. <https://doi.org/10.1109/LCA.2021.3061408>
3. Bertsekas D.P., Gallager R.G. *Data Networks*. London: Prentice-Hall; 1992. 556 p.
4. Yen J.Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*. 1971;17(11):712–716. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712>
5. Arbelaez A., Mehta D., O'Sullivan B., Quesada L. A Constraint-Based Local Search for Edge Disjoint Rooted Distance-Constrained Minimum Spanning Tree Problem. In: *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming, 18–22 May 2015, Barcelona, Spain*. Cham: Springer; 2015. P. 31–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18008-3_3
6. Kuipers F., Van Mieghem P., Korkmaz T., Krunz M. An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing. *IEEE Communications Magazine*. 2002;40(12):50–55. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2002.1106159>
7. Taft-Plotkin N., Bellur B., Ogier R. Quality-of-service routing using maximally disjoint paths. In: *1999 Seventh International Workshop on Quality of Service, 31 May – 04 June 1999, London, UK*. IEEE; 1999. P. 119–128. <https://doi.org/10.1109/iwqos.1999.766485>
8. Huang G.M., Zhu Sh. A fast distributed optimal routing algorithm for multicommodity large data networks. In: *Proceedings of 9th International Parallel Processing Symposium, 25–28 April 1995, Santa Barbara, CA, USA*. IEEE; 1995. P. 551–555. <https://doi.org/10.1109/IPPS.1995.395985>
9. Jain A., Chaudhari N.S. Genetic algorithm for optimizing network load balance in MPLS network. In: *2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, 03–05 November 2012, Mathura, India*. IEEE; 2012. P. 122–126. <https://doi.org/10.1109/cicn.2012.119>
10. Zhu Sh., Huang G.M. A new packet-loss minimization routing algorithm for ATM high-speed data networks. In: *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, 13 December 1996, Kobe, Japan*. IEEE; 2012. P. 287–292. <https://doi.org/10.1109/CDC.1996.574317>
11. Gaipov K., Tausnev D., Khodenkov S., et al. Heuristic Greedy-Gradient Route Search Method for Finding an Optimal Traffic Distribution in Telecommunication Networks. *Algorithms*. 2024;17(1):7. <https://doi.org/10.3390/a17010007>

12. Karakostas G. Faster approximation schemes for fractional multicommodity flow problems. *ACM Transactions on Algorithms*. 2008;4(1):13. <https://doi.org/10.1145/1328911.1328924>
13. Stanovov V., Akhmedova Sh., Semenkin E. Genetic Algorithm with Success History based Parameter Adaptation. In: *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence, 17–19 September 2019, Vienna, Austria*. SciTePress; 2019. P. 180–187. <https://doi.org/10.5220/0008071201800187>
14. Diestel R. *Graph Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2025. 455 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Становов Владимир Вадимович, кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: vladimirstanovov@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-1695-5798](https://orcid.org/0000-0002-1695-5798)

Vladimir V. Stanovov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of System Analysis and Operations Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Тауснев Даниил Алексеевич, инженер научной лаборатории «Спутниковые телекоммуникационные системы», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: mr.tays@bk.ru

ORCID: [0009-0009-3827-3032](https://orcid.org/0009-0009-3827-3032)

Daniil A. Tausnev, Engineer of Scientific Laboratory «Satellite Telecommunication Systems», Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Горбунов Сергей Михайлович, аспирант кафедры интеллектуальных систем управления Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: jeelary@yandex.ru

ORCID: [0009-0003-2307-8759](https://orcid.org/0009-0003-2307-8759)

Sergei M. Gorbunov, Postgraduate at the Department of Intelligent Control Systems, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Морозов Эдуард Вячеславович, аспирант кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: morozoveduardmsd@gmail.com

ORCID: [0009-0000-3072-6951](https://orcid.org/0009-0000-3072-6951)

Eduard V. Morozov, Postgraduate at the Department of System Analysis and Operation Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Гаипов Константин Эдуардович, кандидат технических наук, и. о. заведующего научной лабораторией «Спутниковые телекоммуникационные системы», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева.

e-mail: gaipovke@yandex.ru

ORCID: [0000-0003-4146-5763](https://orcid.org/0000-0003-4146-5763)

Konstantin E. Gaipov, Candidate of Engineering Sciences, Acting Head of Scientific Laboratory «Satellite Telecommunication Systems», Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 21.06.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026;
принята к публикации 16.09.2026.*

*The article was submitted 21.06.2026; approved after reviewing 03.09.2026;
accepted for publication 16.09.2026.*