

Раздел III. Связь, навигация и наведение

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-213-221

Н.В. Колесов, А.М. Грузликов, Ю.М. Скородумов, В.С. Тюльников

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ СООБЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ СЕТЕЙ АНПА

Рассматривается класс телекоммуникационных сетей с подвижными узлами, важным подклассом которых являются так называемые географические сети. Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого узла сети информации о географических координатах всех узлов, благодаря чему каждый узел знает полную топологию графа сети, что позволяет оперативно находить нужное число маршрутов передачи информации между любыми двумя узлами. Целью настоящей статьи является исследование алгоритмов многопутевой маршрутизации, для чего предлагается метод автоматического синтеза адекватных тестовых моделей сетей практически неограниченной сложности. В основе предлагаемого решения лежит композиционный подход, при котором сначала формируется относительно простой фрагмент сети, удовлетворяющий заданным ограничениям, после чего итоговая модель выстраивается как композиция копий такого фрагмента. Для исследования эффективности алгоритмов многопутевой маршрутизации предложен композиционный метод случайного синтеза тестовых моделей сложных сетей, удовлетворяющих ограничениям на межвершинные расстояния. Данный метод был применен к исследованию двух алгоритмов маршрутизации, в результате чего был получен большой массив показательных модельных данных. Полученные результаты, представленные в виде графиков, демонстрируют рост выигрыша во времени передачи сообщений по мере увеличения длины очереди в целевом потоке. Установлено, что эффективность многопутевой маршрутизации незначительна в условиях малой загрузки сети, однако ее полезность возрастает с ростом загрузки сети. Аналогичный уровень роста эффективности демонстрируется при переходе от алгоритма, не допускающего пересечения используемых путей, к алгоритму, допускающему такие пересечения.

Телекоммуникационная сеть; многопутевая маршрутизация; кратчайший путь; графовые модели.

N.V. Kolesov, A.M. Gruzlikov, Yu.M. Skorodumov, V.S. Tiulnikov

INVESTIGATING MULTIPATH MESSAGE ROUTING ALGORITHMS THROUGH THREE-DIMENSIONAL GRAPH MODELS OF AUV NETWORKS

This paper examines a class of telecommunication networks with mobile nodes, an important subclass within which is the so-called geography-aware networks. Their distinguishing feature is the availability of information about the geographic coordinates of all nodes in the network to each individual node, whereby each node is aware of the complete topology of the network graph, which enables rapid identification of the required number of information transmission routes between any two nodes. The purpose of this article is to investigate multipath routing algorithms. To this end, we propose a method for the automatic synthesis of adequate test models capable of representing networks of virtually unlimited complexity. The proposed solution is based on a compositional approach, in which a relatively simple network fragment that satisfies given constraints is first formed, and then the resulting model is constructed as a composition of copies of this fragment. To investigate the efficiency of multipath routing algorithms, we propose a compositional method for the random synthesis of test models of complex networks that satisfy constraints on distances between the vertices. This method was applied to the investigation of two routing algorithms, resulting in a large body of illustrative model data. The obtained results, presented in the form of graphs, demonstrate an increase in the gain in message transmission time as the queue length in the

target flow grows. While the efficiency of multipath routing is insignificant under low network load conditions, its usefulness increases with growing network load. A similar increase in efficiency is demonstrated when transitioning from an algorithm that does not allow intersecting paths to an algorithm that allows such intersections.

Telecommunication network; multipath routing; shortest path; graph models.

Введение. Телекоммуникационные сети занимают важное место в современном мире. Сети могут быть образованы как подводными, так и надводными, а также воздушными аппаратами [1–4]. Ниже рассматривается класс географических сетей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого аппарата сети знания географических координат всех остальных аппаратов и, как следствие, знания графа сети. Это происходит за счет оперативного обмена значениями координат в предположении их неизменности за время обмена. Важным этапом проектирования сетей является разработка алгоритма маршрутизации сообщений, а именно, проблема поиска маршрутов для их скорейшей доставки. Казалось бы, этот вопрос в географических сетях может быть решен с привлечением известного алгоритма Дейкстры для поиска кратчайших путей в графе [5]. Однако на практике сети могут достигать весьма значительных размеров, когда передача всех сообщений по одному маршруту оказывается неэффективной, и возникает необходимость в многопутевой маршрутизации [6–14]. В этом случае для каждого сообщения строится более одного маршрута на случай, если основной маршрут будет перегружен, или он будет нарушен в результате отказа, или возникнет необходимость в существенном увеличении скорости доставки сообщений за счет перехода к параллельному процессу. Решение этой задачи рассмотрено в различных постановках. Некоторые решения предполагают использование полностью непересекающихся путей [8], другие напротив допускают их пересечения [9]. Также известны решения, обладающие способностью варьирования задержкой в передаче [10], свойствами адаптивности [12, 13] и энергосбережения [14].

Настоящая статья является логическим продолжением работы [15], в которой был предложен двухкритериальный алгоритм многопутевой маршрутизации с ускоренной доставкой сообщений, поставляющий дополнительные пути с минимальным числом пересечений. В дальнейшем изложении, нацеленном на оценку эффективности этого алгоритма, можно выделить два основных новых предложения. Первое предложение представлено алгоритмом случайного синтеза тестовых примеров в виде трехмерных графовых моделей сетей. Второе предложение – это результаты статистического исследования эффективности упомянутого алгоритма многопутевой маршрутизации с использованием полученных примеров. Исследование алгоритма проводится в сопоставлении с известным алгоритмом многопутевой маршрутизации, основанном на использовании независимых путей.

Алгоритмы многопутевой маршрутизации. Предварительные сведения. Традиционная математическая постановка решаемой задачи заключается в следующем. Предполагается, что анализируемая сеть задана направленным графом $G(E, V)$, где E – множество ребер, V – множество вершин. При этом ребра графа $\{\rho_i \mid i = \overline{1, n}\}$ взвешены значениями $\{w_i \mid i = \overline{1, n}\}$ расстояний между инцидентными вершинами (n – число ребер в графе $G(E, V)$). Требуется для заданной пары вершин графа найти необходимое количество кратчайших непересекающихся путей. Понятно, что успешность решения поставленной задачи зависит от свойств графа и от эффективности применяемых средств анализа. Может так оказаться, что между выделенными вершинами непересекающихся путей нет, либо эти пути не являются кратчайшими. Поэтому на практике предметом поиска могут быть, например, пути с минимальным числом пересечений. Именно эта схема решения обсуждается ниже и в работе [15].

В кратком изложении суть алгоритма состоит в следующем [15]. Сначала для двух выделенных вершин строится кратчайший путь с использованием алгоритма Дейкстры, который использует критерий минимума длины. Далее ребра, принадлежащие этому пути, исключаются из графа $G(E, V)$, а в полученном графе $G'(E', V)$ отыскивается другой путь между теми же вершинами. Однако алгоритм поиска уже несколько иной, отли-

чающийся от алгоритма Дейкстры. В его основе лежит критерий минимума числа пересечений с ранее полученным кратчайшим путем, причем критерий минимума длины используется как вспомогательный. Понятно, что, если требуется построить большее число путей, то описанные действия могут быть продолжены по аналогии.

Приведем алгоритм построения второго (третьего и т.д.) пути [15]. В нем используется сведение двухкритериальной задачи к двум последовательно решаемым однокритериальным задачам. Как уже отмечалось, первым критерием является минимум числа пересечений с ранее полученным кратчайшим путем.

Будем считать пути пересекающимися, если у них имеется хотя бы одна общая вершина. Сопоставим с каждым ребром графа сети векторный вес $\{s_i = (r_i, w_i) \mid i = \overline{1, n}\}$. При этом первая компонента вектора определяется по правилу:

$$r_i = \begin{cases} 0, & \text{если ни одна вершина ребра не принадлежит кратчайшему пути,} \\ 1, & \text{если одна вершина ребра принадлежит кратчайшему пути.} \end{cases}$$

Алгоритм 1.

1. Построить кратчайший путь с использованием алгоритма Дейкстры. Пусть он включает $n_{кр}$ ребер, а его длина равна $l_{кр} = \sum_{i=1}^{n_{кр}} w_{кр,i}$.

2. Перейти к анализу графа $G'(E', V)$, который получается путем исключения из графа $G(E, V)$ ребер кратчайшего пути.

3. Построить в графе $G'(E', V)$ дублирующий путь с использованием алгоритма, который отличается от алгоритма Дейкстры содержанием правил обработки весов $\{S_j = (R_j, W_j) \mid j = \overline{1, m}\}$ в вершинах $\{v_j \mid j = \overline{1, m}\}$ графа $G'(E', V)$, имеющими для ребра ρ , инцидентного вершинам v_k и v_j , следующий вид:

$$\begin{aligned} \blacklozenge \quad R_j(t+1) &= \min \{(R_k(t) + r_i), R_j(t)\}, \\ \blacklozenge \quad W_j(t+1) &= \begin{cases} W_k(t) + w_i, & \text{если } (R_k(t) + r_i) < R_j(t), \\ \min\{W_k(t) + w_i, W_j(t)\}, & \text{если } (R_k(t) + r_i) = R_j(t). \end{cases} \end{aligned}$$

Упорядочивание очереди сообщений. В рассматриваемой сети узлы с заданным периодом передают пакеты сообщений, которые состоят из собственных сообщений, сгенерированных передающим абонентом, а также из сообщений, полученных от других абонентов на предыдущем периоде, и которые необходимо ретранслировать. Известно, что в общем случае различным упорядоченностям сообщений, передаваемых узлом, будет соответствовать различная оперативность доставки сообщений. С правилами упорядочивания можно познакомиться в работах [15, 16]. В результате реализация многопутевых маршрутов будет включать три этапа и выглядит следующим образом. На первом этапе сформированная выходная очередь сообщений упорядочивается, как и в случае однопутевой маршрутизации в соответствии с упомянутыми правилами, обеспечивая сокращение времени доставки при однопутевой маршрутизации. На втором этапе преобразованная очередь распределяется между путями доставки с сохранением достигнутой упорядоченности и обеспечением сбалансированности нагрузки на основе длины путей. На третьем этапе происходит восстановление исходной очереди при приеме. Следует оговориться, что предлагаемое решение в общем случае является приближенным.

Синтез трехмерной графовой модели сети АНПА при ограничениях. В настоящем разделе описывается подход к анализу эффективности алгоритмов маршрутизации в сетях АНПА. Проблема получения объективной оценки эффективности некоторого алгоритма является достаточно сложной. Один из общепризнанных путей состоит в использовании случайным образом генерируемых примеров [17, 18]. Суть предлагаемого подхода состоит в следующем. С помощью предлагаемых средств автоматически и случайным образом синтезируются примеры моделей для сетей АНПА в виде трехмерных графов информационных связей аппаратов. На каждой модели апробируются алгоритмы маршрутизации, при этом эффективность их применения оценивается статистически. На первый взгляд, реализация этого подхода не должна вызывать проблем. Действительно, можно пойти по следующему пути. Задать числом n вершин в искомым графе. Да-

лее случайным образом выбрать дерево будущего графа. Для этого можно воспользоваться кодом Прюфера Х. [19], случайный выбор которого позволяет однозначно сформировать остовное дерево графа. Вводя тем или иным образом желаемое число замыкающих ребер, получаем окончательный циклический граф с заданным числом базовых циклов, который можно рассматривать как модель некоторой сети. Этот прием, основанный на использовании плоских графов, был применен авторами в работе [20] при исследовании алгоритмов назначения заданий в распределенных вычислительных системах.

Однако на этом пути в данном случае возникает проблема адекватности полученной модели по отношению к физически реализуемой сети. Действительно, уместно вспомнить, что гидроакустический канал связи, используемый в сетях АНПА, возникает между аппаратами всякий раз, когда расстояние между ними оказывается не больше максимально допустимого значения d_0 . Если процедура построения модели не учитывает этого ограничения, то получаемая модель в общем случае не будет отражать некоторые из реально существующих в сети каналов связи. От этого недостатка свободен предлагаемый подход.

Понятно, что для учета этого ограничения синтезируемый трехмерный граф должен быть размещен в евклидовом пространстве. Формально цель состоит в переносе заданного графа из двухмерного неметрического в трехмерное евклидово пространство с выполнением набора ограничений на межвершинные расстояния. В принципе описанные действия могут быть продолжены до успешного завершения с привлечением генетического алгоритма. Такая попытка была осуществлена авторами и продемонстрировала существенно ограниченные возможности подобного подхода по размерности синтезируемых за приемлемое время графов. В связи с этим был предложен и реализован другой подход, описываемый ниже.

В предложенном подходе для учета ограничений на межвершинные расстояния будем считать, что в трехмерном пространстве набором взаимно перпендикулярных плоскостей задана равномерная сетка, разбивающая пространство на элементарные ячейки. При этом форма ячейки кубическая с ребром d , где

$$d \leq d_0 < \sqrt{2}d.$$

Будем располагать вершины графа только в узлах сетки, а ребра графа – только по линиям сетки. В результате каждая его вершина будет характеризоваться тремя координатами. При этом между смежными вершинами графа будет расстояние d , а между его несмежными вершинами – больше d . На рис. 1 ниже приведен пример, когда граф типа дерево (рис. 1,а), содержащий пять вершин, размещен в одной ячейке с соблюдением выдвинутого требования (рис. 1,б).



Рис. 1. Пример размещения дерева (а) в графе (б)

Перечислим характеристики, учет которых при соответствующей конкретизации важен для процесса размещения во фрагменте любого масштаба. Прежде всего, заметим, что в размещенное в кубе (рис. 1,б) дерево нельзя добавить ни одного ребра без нарушения ограничения. Действительно, в этом случае любая новая вершин окажется смежной с какой-либо уже существующей вершиной дерева, а значит, возникнет дополнительный не предусмотренный на рис. 1,а канал. Еще одна важная характеристика рассматриваемого случая – в кубе можно разместить дерево со степенью вершин не более трех. Наконец, последнее очевидное свойство – для организации цикла в размещенном графе необходимо включение в него хотя бы двух дополнительных ребер и хотя бы одной дополнительной вершины.

Нетрудно видеть, что процесс размещения в сетке дерева с большим количеством вершин характеризуется высокой трудоемкостью. Для ее сокращения можно пойти по следующему пути, а именно, ограничиться размещением относительно небольшого графа в существенно ограниченном фрагменте сетки, а затем получать неограниченно сложные встроенные графы путем объединения этих базовых фрагментов. Ниже описывается реализация именно этой идеи.

В качестве базового фрагмента предлагается выбрать куб, объединяющий восемь простейших кубов (рис. 2) (в дальнейшем просто «куб»). Он характеризуется множеством из 27 вершин.

Конечно, такой выбор основан только на интуиции. Размеры фрагмента позволяют при невысоком уровне трудоемкости размещать в нем достаточно сложные графы. Конечно, возможны и другие решения. Подытожим основные шаги предлагаемого алгоритма.

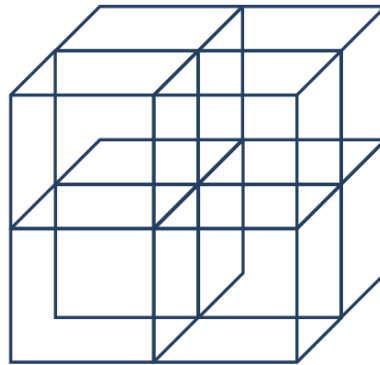


Рис. 2. Базовый фрагмент сетки – куб

Алгоритм 2.

1. Выделить по случайным образом сформированному коду Прюфера порождающее дерево, которое содержит $n \leq 27$ вершин, а степень вершин не превышает 6.
2. Разместить выбранное дерево в восьмикубовом фрагменте.
3. Исключить в размещенном дереве висячие вершины путем введения замыкающих цепочек ребер между ними, используя алгоритм поиска в ширину.
4. Сформировать сложный композиционный граф путем соединения восьмикубовых фрагментов.

Уточним содержание п.2 алгоритма 1. В основу его реализации положен перебор вариантов.

Алгоритм 3.

1. Разместить вершину дерева с максимальной степенью в вершине 8-куба с наименьшей степенью.
2. Разместить инцидентные ей ребра по линиям сетки.
3. Для каждого ребра разместить смежные с ним ребра. Если при размещении нарушаются ограничения, то перейти к другому варианту. Если список вариантов исчерпан, то граф не размещается в 8-кубе.

Пример. Разместим в 8-кубе дерево с десятью вершинами (рис. 3).

Получаем (рис. 4).

Добавим в размещенное дерево замыкающие цепочки. Вершины 5 и 10 соединяются цепочкой (5, 11, 12, 13, 10). Проверяем, не образовались ли попутно новые ребра. В данном случае такое ребро есть – (7, 11). Появляется цикл (5, 2, 7, 11). Вершины 6 и 8 соединяются через дополнительную вершину 14. Вершины 9 и 10 соединяются через дополнительную вершину 15. В результате получаем граф (рис. 5).

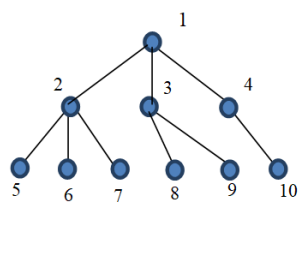


Рис. 3. Пример дерева

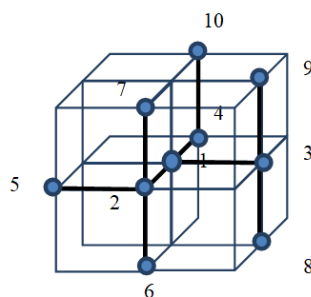


Рис. 4. Куб с размещенным в нем деревом

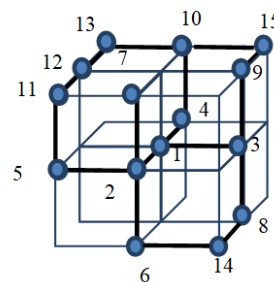


Рис. 5. Куб с размещенным в нем графом

Несколько слов о синтезе композиционных графов. Соединять два куба можно, совместив две их грани. Достаточным условием совмещения двух граней является их идентичность. При этом можно формировать композиционные графы, используя один и тот же куб с размещенным в нем деревом. В примере правую грань можно совместить с такой же гранью другого куба, развернутого соответствующим образом. Понятно, что, выстраивая из кубов новые фигуры, можно пойти разными путями, получая разные результирующие архитектуры. Так, например, можно вытягивать новую фигуру в цепочку, можно выстраивать некоторый «мегакуб», можно компоновать фигуру случайным образом. По-видимому, эти варианты будут обладать разными свойствами с точки зрения многопутевой маршрутизации. В следующем разделе приводятся некоторые результаты исследования этих свойств (рис. 6–9).

Результаты моделирования. При моделировании использовались алгоритмы 1–3 с размещением в кубе графов с порождающими деревьями из 15-ти вершин. Размещалось 100 различных графов с последующим осреднением результатов. Композиционные графы с архитектурой «цепочка» (рис. 6–9) содержали от одного до пяти кубов, а графы с архитектурой «мегакуб» (рис. 10, 11) – 27 кубов. Моделировалась работа алгоритмов с удалением и без удаления ребер при использовании двух или трех путей. Ускорение времени доставки (ось ординат) оценивалось отношением величины ускорения к времени однопутевой доставки. В каждом модельном эксперименте в сети выделялись два наиболее удаленных друг от друга узла, между которыми организовывался целевой (исследуемый) поток с назначаемой очередью от 10 до 100 сообщений (ось абсцисс). При этом в каждом из узлов сети формировались собственные сообщения, число которых варьировалось и определяло степень загрузки сети от 20% до 80% (параметр семейства графиков).

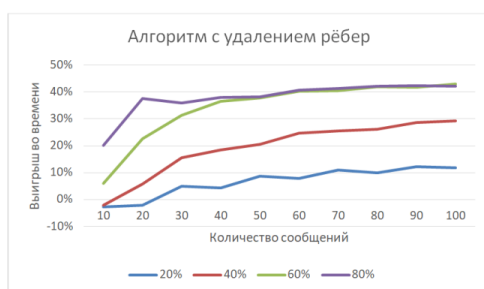


Рис. 6. Архитектура «цепочка» (два куба)

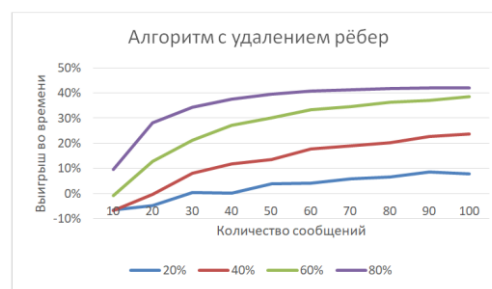


Рис. 7. Архитектура «цепочка» (пять кубов)

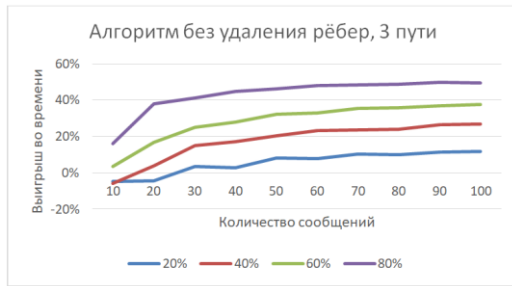


Рис. 8. Архитектура «цепочка» (два куба)

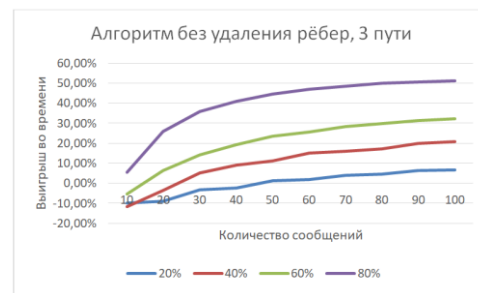


Рис. 9. Архитектура «цепочка» (пять кубов)

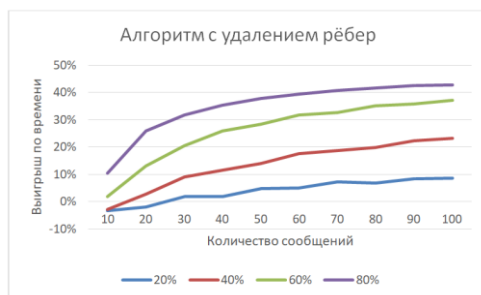


Рис. 10. Архитектура «мегакуб» (27 кубов)

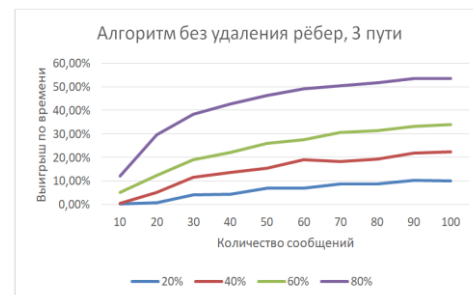


Рис. 11. Архитектура «мегакуб» (27 кубов)

На рис. 10 и 11 представлены результаты моделирования при архитектуре «мегакуб», где демонстрируется некоторое повышение эффективности.

Обсуждение. Приведенные выше графики, хоть и отражают лишь незначительную часть полученных результатов, являются достаточно показательными. В частности они демонстрируют характер нарастания выигрыша с увеличением длины очереди в целевом потоке, и при этом незначительную эффективность или даже вред многопутевой маршрутизации при малонагруженной сети. Примечательно нарастание ее полезности с ростом загруженности сети и ростом протяженности «цепочки». Такого же уровня рост демонстрируется при переходе от алгоритма, не допускающего пересечения используемых путей к алгоритму, допускающему такое пересечение.

Заключение. В статье исследуются характеристики некоторой технологии многопутевой маршрутизации сообщений в телекоммуникационной сети АНПА. Она предполагает последовательное решение задач поиска набора путей для передачи сообщений, оптимального упорядочивания выходной очереди сообщений с целью ускорения доставки сообщений и последующее распределение очереди между найденными путями. В статье предлагается подход к исследованию эффективности алгоритмов многопутевой маршрутизации сообщений, основанный на случайном синтезе адекватных трехмерных моделей сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks // Comput. Stand. Interfaces. – 2020. – Vol. 72. – Art. 103451.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – Владивосток: Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2018. – 368 с.

3. Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д., Павин А. М., Панин М.А. Обнаружение и обследование локальных донных объектов с помощью группы специализированных автономных подводных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1.
4. Кузнецов К.А., Парамонов А.И., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Модель и методы маршрутизации трафика в сети связи с использованием БПЛА // Тр. учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 62-72.
5. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Вильямс, 2010. – 1296 с.
6. Шувалов В.П., Вараксина И.Ю. Классификация методов многопутевой маршрутизации // T-comm. – 2014. – № 1.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of Multipath Transmissions in the Nodes of Switching Segments of Reserved Paths // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – 2022. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976839.
8. Еременко А.С. Потокковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети // Проблемы телекоммуникаций. – 2015. – № 1. – С. 85-93.
9. Zuo, Y., Ling, Z., Yuan, Y.A. Hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks // J Wireless Com Network. – 2013. – 82 (2013).
10. Venkatesh K., Srinivas L., Krishnan M.M., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications // Future Generation Computer Systems. – 2019. – 93. – P. 256-65.
11. Ducatelle F, Di Caro GA, Gambardella L.M. Ant agents for hybrid multipath routing in mobile ad hoc networks // Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS 2005). St Moritz, 19–21 January 2005. – P. 44-53.
12. Sahhaf S., Tavernier W., Colle D., Pickavet M. Adaptive and reliable multipath provisioning for media transfer in SDN-based overlay networks // Computer Communications. – 2017. – 106. – P. 107-16.
13. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Разработка и исследование математической модели многопутевой адаптивной маршрутизации в сетях связи с балансировкой нагрузки // Электросвязь. – 2014. – № 12.
14. Rajasekaran K., Balasubramanian K. Energy Conscious based Multipath Routing Algorithm in WSN // International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS). – 2016. – Vol. 8, No. 1. – P. 27-34.
15. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Тюльников В.С. Многопутевая маршрутизация в сетях с ускоренной доставкой сообщений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2026. – № 1. – С. 62-72.
16. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М. Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов // ТиСУ. – 2022. – № 6.
17. Frieze A., Karonsky M. Introduction to random graphs. – Cambridge University Press, 2025. – 698 p.
18. van der Hofstad R. Random graphs and complex networks. – Vol. 2. – Eindhoven University Press, 2024. – 508 p.
19. Prüfer H. Neuer Beweis eines Satzes über Permutationen // Arch. Math. Phys. – 1918.
20. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Толмачева М.В., Скородумов Ю.М. Графовый подход к назначению заданий в распределенных системах реального времени // ТиСУ. – 2014. – № 4. – С. 28-38.

REFERENCES

1. Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks, *Comput. Stand. Interfaces*, 2020, Vol. 72, Art. 103451.
2. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic systems: systems, technologies, applications]. Vladivostok: Institut problem morskikh tekhnologiy Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2018, 368 p.
3. Inzartsev A.V., Eliseenko G.D., Pavin A. M., Panin M.A. Obnaruzhenie i obsledovanie lokal'nykh donnykh ob"ektov s pomoshch'yu gruppy spetsializirovannykh avtonomnykh podvodnykh ob"ektov [Detection and inspection of local bottom objects using a group of specialized autonomous underwater objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 1.
4. Kuznetsov K.A., Paramonov A.I., Muthanna A.S.A., Kucheryavyy A.E. Model' i metody marshrutizatsii trafika v seti svyazi s ispol'zovaniem BPLA [Model and methods of traffic routing in a communication network using UAVs], *Tr. uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of Educational Institutions of Communication], 2024, Vol. 10, No. 4, pp. 62-72.
5. Kormen T.Kh., Leyzerson Ch.I., Rivest R.L., Shtayn K. Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis]. Moscow: Vil'yams, 2010, 1296 p.
6. Shuvalov V.P., Varaksina I.Yu. Klassifikatsiya metodov mnogoputevoy marshrutizatsii [Classification of multipath routing methods], *T-comm*, 2014, No. 1.

7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of Multipath Transmissions in the Nodes of Switching Segments of Reserved Paths, *2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976839.
8. Eremenko A.S. Potokovaya model' mnogoputevoy marshrutizatsii po neperesekeyushchimsya putyam v telekommunikatsionnoy seti [Flow model of multipath routing along non-intersecting paths in a telecommunication network], *Problemy telekommunikatsiy* [Problems of Telecommunications], 2015, No. 1, pp. 85-93.
9. Zuo, Y., Ling, Z., Yuan, Y.A. Hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks, *J Wireless Com Network*, 2013, 82 (2013).
10. Venkatesh K., Srinivas L., Krishnan M.M., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications, *Future Generation Computer Systems*, 2019, 93, pp. 256-65.
11. Ducatelle F, Di Caro GA, Gambardella L.M. Ant agents for hybrid multipath routing in mobile ad hoc networks, *Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS 2005). St Moritz, 19–21 January 2005*, pp. 44-53.
12. Sahhaf S., Tavernier W., Colle D., Pickavet M. Adaptive and reliable multipath provisioning for media transfer in SDN-based overlay networks, *Computer Communications*, 2017, 106, pp. 107-16.
13. Koryachko V.P., Perepelkin D.A. Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli mnogoputevoy adaptivnoy marshrutizatsii v setyakh svyazi s balansirovkoj nagruzki [Development and research of a mathematical model of multipath adaptive routing in communication networks with load balancing], *Elektrosvyaz'* [Electrosvyaz'], 2014, No. 12.
14. Rajasekaran K., Balasubramanian K. Energy Conscious based Multipath Routing Algorithm in WSN, *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, 2016, Vol. 8, No. 1, pp. 27-34.
15. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunen E.G., Tyul'nikov V.S. Mnogoputevaya marshrutizatsiya v setyakh s uskorennoy dostavkoj soobshcheniy [Multipath routing in networks with accelerated message delivery], *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technology, Mechanics and Optics], 2026, No. 1, pp. 62-72.
16. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunen E.G., Skorodumov Yu.M. Optimizatsiya informatsionnykh obmenov v seti avtonomnykh abonentov [Optimization of information exchanges in the network of autonomous subscribers], *TiSU* [Theory and Control Systems], 2022, No. 6.
17. Frieze A., Karonsky M. Introduction to random graphs. Cambridge University Press, 2025, 698 p.
18. van der Hofstad R. Random graphs and complex networks. Vol. 2. Eindhoven University Press, 2024, 508 p.
19. Prüfer H. Neuer Beweis eines Satzes über Permutationen, *Arch. Math. Phys.*, 1918.
20. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Tolmacheva M.V., Skorodumov Yu.M. Grafovy podkhod k naznacheniyu zadaniy v raspredelennykh sistemakh real'nogo vremeni [Graph approach to task assignment in distributed real-time systems], *TiSU* [Theory and Control Systems], 2014, No. 4, pp. 28-38.

Колесов Николай Викторович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: kolesovnv@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89213886806; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Грузликов Александр Михайлович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89312664852; к.т.н.; начальник отдела.

Скородумов Юрий Михайлович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: skorum@email.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89112861889; к.т.н.; начальник лаборатории.

Тюльников Виктор Сергеевич – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: viktor.tyulnikov@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89119757141; инженер-программист 2-й категории.

Kolesov Nikolai Viktorovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: kolesovnv@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213886806; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Gruzlikov Alexander Mikhailovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79312664852; cand. of eng. sc.; head of department.

Skorodumov Yuri Mikhailovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: skorum@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79112861889; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

Tiulnikov Viktor Sergeevich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: viktor.tyulnikov@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; phone: +79119757141; software engineer.