

## МАРШРУТИЗАЦИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ

К. В. Авдеев

*Рассмотрен известный алгоритм поиска пути в ориентированном графе – алгоритм Дейкстры для выбора радиоканалов в распределенных цифровых системах передачи информации. Рассмотрены необходимые входные данные алгоритма, которые позволяют устройствам в беспроводных сетях автоматически выбирать оптимальные маршруты для передачи данных. Представлены концепции маршрутизации на основе состояния канала и методы динамической маршрутизации, учитывающие особенности беспроводной среды.*

*Ключевые слова:* цифровая связь, алгоритмы маршрутизации, помехоустойчивость, оптимальный путь на графе, алгоритм Дейкстры, вероятность битовой ошибки, маршрутизация на основе состояния радиоканала.

### Введение

В мире современных коммуникаций и беспроводных технологий при стремлении обеспечить большее покрытие, а также предложить высокую достоверность передаваемых данных распределенные цифровые радиосистемы передачи информации играют ключевую роль в обеспечении связи между удаленными объектами при различных условиях. Под условиями в данном случае понимаются факторы, влияющие на качество связи, к которым можно отнести помеховую обстановку, рельеф местности, параметры узлов и компонентов самих систем и пр. В таких системах, где устройства, предназначенные для приема, обработки и дальнейшей передачи информации, могут быть распределены в рамках одной местности на больших расстояниях, формируя распределенную цифровую систему передачи информации (ЦСПИ), которую можно рассматривать как общую сеть, функционирующую в децентрализованном режиме, либо по принципу «ведущий – ведомый». В таких сетях задача эффективной маршрутизации данных становится необходимостью.

Алгоритмы маршрутизации в распределенных ЦСПИ представляют собой адаптивные методы управления потоками данных в условиях ограниченной пропускной способности, переменных условий среды и ограниченной энергии устройств. Они играют важную роль в обеспечении надежной передачи данных и оптимизации использования ресурсов в таких сетях.

В статье рассмотрен метод маршрутизации, основанный на состоянии радиоканалов, связывающих узлы сети, представляющие собой устройства, входящие в состав распределенной ЦСПИ. Вместе с тем изложены основные ограничения, стоящие при выборе алгоритмов маршрутизации в беспроводных системах радиосвязи, такие как динамические изменения в среде распространения сигнала.

Данные концепции позволяют оценить роль алгоритмов маршрутизации в создании надежных и эффективных беспроводных сетей, которые находят применение в сферах от построения сетей ретрансляторов до управления движущимися объектами.

### Графовая модель распределенной цифровой системы передачи информации

В качестве распределенной ЦСПИ можно рассмотреть некоторую сеть, состоящую из устройства – источника сигнала, и его получателей, способных ретранслировать сигнал с целью доставки информации до удаленных от источника устройств, входящих в эту же сеть при ограниченной дальности связи (рис. 1). Такая модель позволяет представить каждое устройство сети как независимый узел, имеющий связь по радиоканалу со своими ближайшими соседними узлами – устройствами, принадлежащими этой же сети, с которыми удаётся установить радиосвязь.

Узлы в базовом случае могут иметь как симплексный, так и дуплексный режим связи с соседними узлами, то есть работать как для передачи информации, так и для приема и передачи.

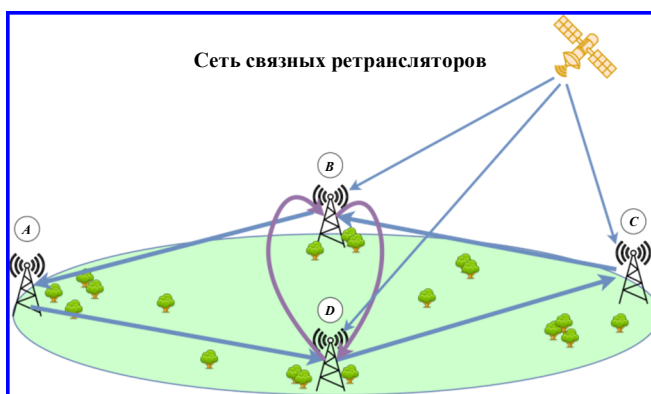


Рис. 1. Распределенная цифровая система передачи информации как сеть связанных ретрансляторов

В радиоканалах, связывающих устройства в распределенной ЦСПИ, можно рассматривать пути, которые проходит радиосигнал при передаче информации от одного узла другому в рамках одной сети. Каждый путь, будучи радиоканалом, подвержен воздействию различных факторов, способных не только ухудшать радиосвязь, но и приводить к полной потере полезной передаваемой информации, представленной в цифровом виде на рис. 2.

К подобного рода факторам можно отнести метеоусловия, непреднамеренное воздействие радиосистем, не входящих в рассматриваемую сеть, а также собственные шумы и помехи, возникающие в распределенной ЦСПИ. Каждый из этих факторов можно рассматривать как отдельный компонент, влияющий на некий интегральный параметр, характеризующий каждый радиоканал.

Таким образом, сеть, работающую в дуплексном режиме и состоящую из  $N$  устройств, можно рассматривать как совокупность отдельных узлов, соединенных между собой путями. Распределенную ЦСПИ, представленную совокупностью узлов и путей, называют графовой моделью. Каждую пару узлов и путь, соединяющий их, в этой модели схематично можно представить в виде ребра графа, как это показано на рис. 3.

На данном рисунке узлы  $A$  и  $B$  представляют собой два соседних устройства в распределенной ЦСПИ, участвующих в передаче информации, линия, соединяющая узлы, демонстрирует наличие радиоканала, связывающего данные устройства. Стрелки на концах линии демонстрируют возможное направление передачи информации, что соответствует дуплексному режиму передачи информации в данном случае.

Устройства распределенной ЦСПИ включают в себя приемо-передающие тракты, а также тракты обработки, преобразования и ретрансляции сигналов, которые ввиду не идеальности характеристик могут оказывать влияние на качество связи и целостность передаваемой информации. В радиоканале же, связывающем каждую пару устройств сети, передаваемый сигнал подвергается воздействию шумов, помех и окружающей среды, в которой сигнал распространяется. Данные факторы в совокупности с внутренними характеристиками устройств способны снижать количество принятой узлом полезной информации, передаваемой ему в распределенной ЦСПИ. Такой подход позволяет внести оценку, называемую весом ребра графа  $W_{ij} \in [0; 1]$ , характеризующую отношение количества полученной полезной информации к количеству передаваемой информации так, что 0 соответствует полной потере информации, а 1 передаче и обработке информации без потерь.

При оценке реальных распределенных ЦСПИ в режиме ретрансляции сигнала по критерию, описанному выше, значения параметра  $W_{ij} = 1$  добиться невозможно, каждое ребро графа будет оцениваться значением  $W_{ij} < 1$ , причем для каждой пары устройств это значение будет отличным и зависящим от факторов, влияющих на качество связи в связывающем их радиоканале. При передаче информации между несколькими устройствами сети, что эквивалентно задействованию нескольких ребер в процессе передачи информации в графовой модели, результирующий вес пути будет равен произведению весов всех ребер, участвующих в процессе передачи информации.

Так, например, распределенная ЦСПИ, состоящая из четырех устройств и представленная графовой моделью, приведенной на рис. 4, характеризуется следующими весами ребер:

$$W_{AB} = 0,99; W_{BC} = 0,98; W_{CM} = 0,95,$$

где  $W_{AB}$  – вес ребра, соединяющего узлы  $A$  и  $B$ ;  $W_{BC}$  – вес ребра, соединяющего узлы  $B$  и  $C$ ;  $W_{CM}$  – вес ребра, соединяющего узлы  $C$  и  $M$ .

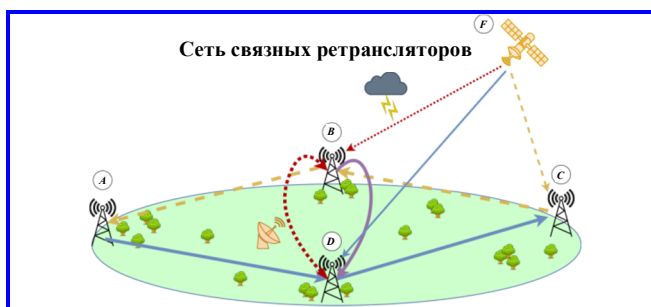


Рис. 2. Влияние различных факторов на параметры радиоканала, приводящее к потере или ухудшению качества связи



Рис. 3. Ребро графа графовой модели распределенной цифровой системы передачи информации

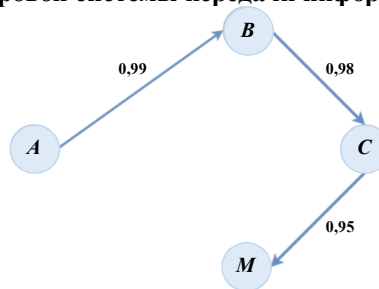


Рис. 4. Графовая модель распределенной цифровой системы передачи информации, состоящей из четырех устройств

Задача передачи информации от узла  $A$  к узлу  $M$  вызывает необходимость использования промежуточных узлов  $B$  и  $C$  и ребер, связывающих эти узлы с другими узлами в модели. Принимая, что узлы  $B$  и  $C$  представляют собой устройства системы, работающие в режиме ретрансляции, можем заключить, что устройства сети в процессе работы не способны изменять параметр  $W_{ij}$ , так как не используют дополнительного преобразования сигналов с целью повышения помехоустойчивости. Тогда вес результирующего пути  $W_{AM}$ , по которому передается информация от узла  $A$  к узлу  $M$ , будет вычисляться согласно выражению 1:

$$W_{AM} = W_{AB} W_{BC} W_{CM}. \quad (1)$$

Используя численные значения весов ребер для подстановки в выражение (1), получим вес результирующего пути равным  $W_{AM} \approx 0,92$ . Это означает, что при заданном количестве устройств в системе и соответствующих характеристиках их радиоканалов будет передано около 92% полезной информации.

При проектировании цифровых систем передачи информации стремятся обеспечить наибольший возможный процент принятой полезной информации. Для этого в распределенных ЦСПИ увеличивают количество устройств и радиоканалов, стремясь обеспечить лучшее качество передачи информации. При большом количестве устройств и радиоканалов в распределенной ЦСПИ возникает задача выбора пути, по которому будет передано как можно большее количество полезной информации. Для решения такой задачи могут быть применены алгоритмы поиска пути по заданному критерию. Применение таких алгоритмов является одним из методов повышения эффективности работы распределенной ЦСПИ.

#### Методика выбора оптимального маршрута в распределенной цифровой системе передачи информации на основе состояния канала

Для выбора оптимальных маршрутов (радиоканалов) передачи информации между устройствами в распределенной ЦСПИ, характеризующихся параметром  $W_{ij}$ , может быть применен известный подход в задачах поиска пути как маршрутизация на основе состояния радиоканала – это один из основных классов алгоритмов маршрутизации в распределенных системах и сетях. Этот подход к маршрутизации основан на том, что каждое

устройство в распределенной сети поддерживает информацию о текущем состоянии всех связанных с ним радиоканалов, и эта информация используется для определения оптимальных маршрутов для передачи данных.

Основные характеристики маршрутизации на основе состояния радиоканала:

1. Извещение о состоянии радиоканалов: каждое устройство в сети периодически отправляет информацию о состоянии своих соседних каналов. Это включает в себя информацию о доступности каждого радиоканала, а также о задержках, пропускной способности и других параметрах.

2. Построение графовой модели сети: устройства используют полученные данные для построения графа, который отражает топологию распределенной ЦСПИ. В этом графе вершинами являются устройства, а ребрами – радиоканалы. Например, для рассмотренной ранее распределенной ЦСПИ, ориентированная графовая модель приведена на рис. 5.

3. Вычисление оптимальных маршрутов: на основе графовой модели распределенной ЦСПИ и информации о состоянии радиоканалов, устройства вычисляют оптимальные маршруты для достижения конечных узлов. Данная задача решается построением алгоритма поиска оптимального пути, частными случаями которого являются алгоритмы Дейкстры, Флойда – Уоршалла и Беллмана – Форда и др.

4. Распространение маршрутной информации: устройства в распределенной ЦСПИ обмениваются информацией о радиоканалах с другими устройствами этой же сети, чтобы обновлять и поддерживать актуальные таблицы маршрутизации.

Преимущества маршрутизации на основе состояния канала включают в себя высокую точность в выборе оптимальных маршрутов и способность быстро адаптироваться к изменениям в сети. Однако этот метод требует более высоких вычислитель-

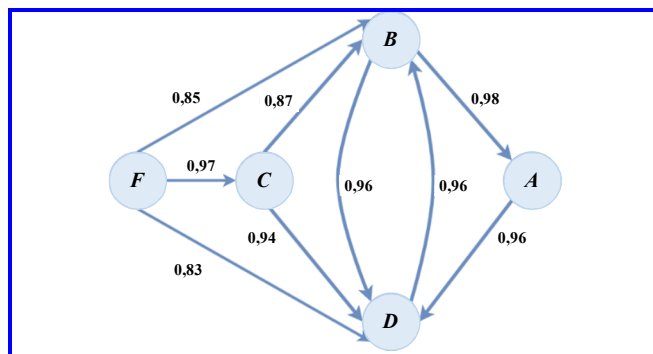


Рис. 5. Ориентированный граф, описывающий распределенную цифровую систему передачи информации

ных ресурсов и большей ширины полосы пропускания для распространения информации о состоянии канала, поэтому его применение чаще всего ограничено сетями с относительно небольшим числом устройств или внутри отдельных автономных систем.

**Алгоритм Дейкстры как метод поиска оптимальных маршрутов передачи информации на графовой модели распределенной цифровой системы передачи информации**

Наиболее часто для решения задачи поиска оптимального маршрута применяется известный алгоритм поиска кратчайшего пути на графовой модели распределенной ЦСПИ Дейкстры. Алгоритм Дейкстры – это алгоритм нахождения кратчайшего пути от одной начальной вершины до всех остальных вершин во взвешенном графе. Основные шаги, выполняемые в рамках алгоритма:

1. Инициализация: устанавливается начальная вершина как текущая вершина, а начальное расстояние от начальной вершины до самой же себя устанавливается равным 0 или 1, в зависимости от критерия поиска пути. До всех остальных вершин расстояние принимается как бесконечность и создается список (или очередь) вершин для поиска, начиная с начальной вершины.

2. Поиск кратчайшего пути: осуществляется поиск смежной вершины (вершины, с которой у начальной имеется связь) в списке с наименьшим расстоянием от начальной вершины до нее. Эта вершина становится текущей, и для каждой смежной с ней вершины, вычисляется новое расстояние до неё через текущую вершину. Сравнивая его с текущим расстоянием до этой вершины, принимается решение: если новое расстояние меньше, расстояние обновляется.

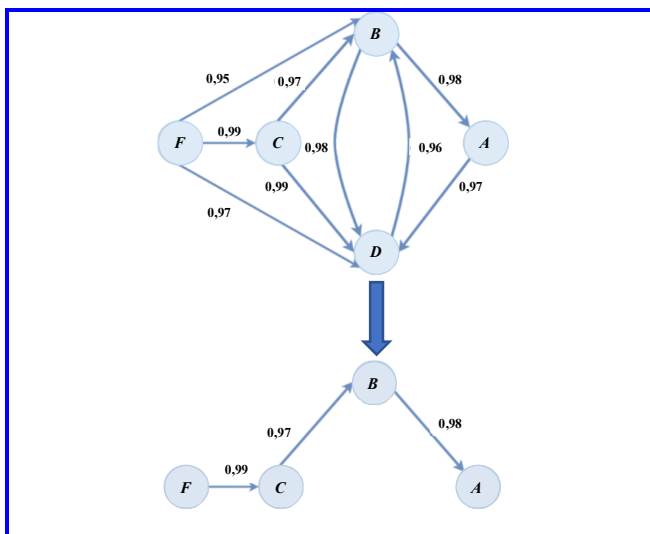
3. Повторение: повторение поиска кратчайшего пути от текущей вершины продолжается до тех пор, пока не будут обработаны все вершины или не достигнута конечная вершина.

4. Завершение: после завершения алгоритма расстояния от начальной вершины до всех остальных вершин будут определены и можно построить кратчайшие пути.

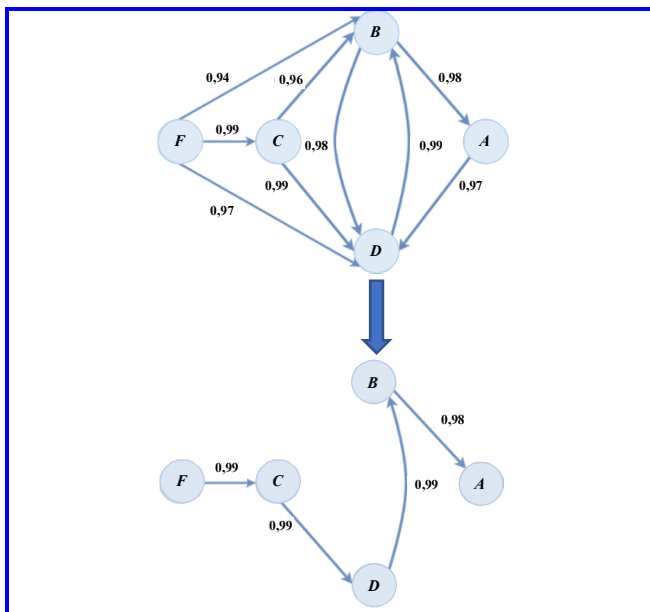
Алгоритм Дейкстры подходит для графов с неотрицательными весами на ребрах и находит кратчайшие пути во времени, когда нет отрицательных циклов. Результат моделирования алгоритма Дейкстры с использованием программной реализации для поиска кратчайшего пути по графовой модели распределенной ЦСПИ с произвольными весами ребер, соответствующих параметру  $W_{ij}$ , и сам граф приведены на рис. 6. Данный алгоритм осуществляет поиск кратчайшего пути от вершины  $F$  до вершины  $A$ . Ос-

новным отличием данной программной реализации от классического варианта этого алгоритма является то, что веса ребер  $W_{ij}$  не складываются, а перемножаются. Оптимальным и кратчайшим в данном случае является тот путь, у которого результирующий вес стремится к единице.

В реальных распределенных системах состояние канала может меняться с течением времени, вследствие чего и вес каждого пути может обновляться. В таком случае вычисление оптимальных маршрутов должно производиться непрерывно для обеспечения лучшего качества передачи полезной информации.



**Рис. 6. Пример выбора оптимального пути по критерию наибольшего веса пути  $W_{ij}$  с помощью алгоритма Дейкстры**



**Рис. 7. Пример выбора оптимального пути по критерию наибольшего веса пути  $W_{ij}$  с помощью алгоритма Дейкстры после изменения веса ребер графовой модели**

На рис. 7 приведен результат моделирования работы алгоритма Дейкстры для графовой модели, приведенной на рис. 6, но с измененными весами ребер в результате изменения состояния радиоканалов.

### Заключение

Для поддержания бесперебойной связи в сети и обеспечения целостности передаваемой полезной информации рационально применение различных методов повышения помехоустойчивости системы в целом. Одним из таких методов является применение эффективного метода маршрутизации в распределенных ЦСПИ. Данный метод, основанный на алгоритме поиска оптимального пути на графовой модели сети, обнаруживает его, задействуя несколько устройств и связанных с ними радиоканалов. Оптимальность такого пути может определяться по заданному заранее параметру, что позволяет использовать один и тот же алгоритм вне зависимости от значения самого параметра. Выбранный параметр – вес ребра  $W_{ij}$  – позволяет обнаруживать в системе такой маршрут, при котором будет обеспечена достоверная передача как можно большей части полезной информации. В действительности этот параметр может быть не единственным, а представлять собой совокупность различных параметров и учитывать, например, скорость и время передачи данных, устойчивость системы, удаленность устройств от источника и др.

Рассмотренный алгоритм Дейкстры эффективно справляется с задачей поиска оптимального пути при циклическом повторении, а также при динами-

ческом изменении состояния радиоканалов, обнаруживая цепочку устройств, которые необходимо задействовать для передачи данных. Данный алгоритм может быть усовершенствован или заменен при возникновении задачи повышения адаптивности сети. В этих целях может использоваться подход в маршрутизации, при котором алгоритм находит несколько оптимальных путей и хранит информацию о них для более быстрой перестройки системы на случай изменения параметров одного или нескольких радиоканалов, делающих путь не оптимальным, а также для разделения одного потока на несколько подпотоков передачи информации.

### Литература

1. Литвинская О. С. Основы теории передачи информации : Учебное пособие / О. С. Литвинская, Н. И. Чернышев. – Москва : КноРус, 2017. – 168 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая связь : Учебное пособие. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 164 с.
3. Таненбаум Э. С. Компьютерные сети / Э. С. Таненбаум, Н. Фимстер, Д. Уэзеролл. – 6-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2024. – 992 с.
4. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 1008 с.
5. Бхаргава А. Грокаем алгоритмы. Иллюстрированное пособие для программистов и любопытствующих / А. Бхаргава. – Санкт-Петербург : Питер, 2022. – 288 с.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд., испр.: Перевод с англ. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

Поступила в редакцию 16.10.2023

*Константин Вячеславович Авдеев, старший преподаватель кафедры РЭСК, т. 8 (965) 109-38-21, e-mail: marselo1910@gmail.com. (МИРЭА – Российский технологический университет).*

## ROUTING IN DISTRIBUTED DIGITAL INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS AS A METHOD OF INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF THE SYSTEM

**K. V. Avdeev**

**A** well-known algorithm for finding a path in a directed graph is considered – Dijkstra's algorithm for selecting radio channels in distributed digital information transmission systems (DSPI). The necessary input data of the algorithm are considered, which allow devices in wireless networks to automatically select the optimal routes for data transmission. The concepts of routing based on the channel state and dynamic routing methods that take into account the features of the wireless environment are presented.

**Keywords:** digital communication, routing algorithms, noise immunity, optimal path on the graph, Dijkstra's algorithm, probability of bit error, routing based on the state of the radio channel.

### References

1. Litvinskaya O. S. Fundamental of information transfer: Study Guide / O. S. Litvinskaya, N. I. Chernyshev. – Moscow: KnoRus, 2017. – P. 168.
2. Sergienko A. B. Digital communication: Study Guide. – Saint-Petersburg: ETU 'LETI', 2012. – P. 164.

3. Tanenbaum E. S .Computer networks / E. S. Tanenbaum, N. Fimster, D. Uezeroll. – 6th ed. – Saint-Petersburg: Piter, 2024. – 992 p.
4. Olifer V. G. Computer Networks. Principles, technologies, protocols: study book for universities / V. G. Olifer, N. A. Olifer. – Saint-Petersburg: Piter, 2020. – P. 1008.
5. Bhargava A. Groking of algorithms. Illustrated guide for programmers and curious persons / A. Bhargava. – Saint-Petersburg: Piter, 2022. – P. 288.
6. Sklyar B. Digital communication. Theoretic basis and practical application / B. Sklyar. – 2th ed., corrected: translated from English. – Moscow: Publishing House ‘Williams’, 2003. – P. 1104.

*Konstantin Vyacheslavovich Avdeev, Senior Lecturer Lecturer at the Department of RSC,  
t. +7 (965) 109-38-21, e-mail: marselo1910@gmail.com.  
(MIREA – Russian Technological University).*