

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ КОНТУРНЫМ МЕТОДОМ

SEARCH FOR OPTIMUM ROUTES IN WIRELESS NETWORKS BY THE LOOP METHOD

K. Gaipov
A. Demicheva
M. Demichev
D. Abramchik
I. Krikunov

Summary: Formulation of the problem. The introduction of satellite constellations in medium and low orbits for the provision of data transmission services requires the designers of such a system to determine a number of parameters when creating its appearance, such as the bandwidth of radio channels of subscriber, feeder and inter-satellite communication lines, the power of signal emission, and the assessment of the possibility of transmitting a given volume information and more. This article provides an algorithm for the formation of a mathematical model for assessing the possibility of data transmission at a given rate between sources and receivers and searching for the required frequency bands of communication channels.

Target. Development of an optimization mathematical model for solving the problem of parametric synthesis of satellite systems and multipath routing, where the optimality criterion is the determination of the minimum required data rate of the inter-satellite communication channel.

Used methods. The calculation is carried out by the contour method based on the tensor analysis of telecommunication networks, according to which information flows passing through communication channels are expressed through a linear combination of flows circulating in linearly independent graph cycles. Using flows in contours allows you to reduce the number of variables in the mathematical model.

Novelty. It consists in adapting the contour analysis method to the problem of parametric synthesis, to search for the required frequency bands for each communication channel.

Result. A mathematical model has been formed to calculate the distribution of traffic flows in the system's communication channels, with the introduction of known information flows from sources to recipients.

Practical significance. The proposed algorithm can be used in the development of wireless data transmission systems, in particular satellite systems.

Keywords: routing, graph, contour method, telecommunication network, frequency distribution.

Гаипов Константин Эдуардович

к.т.н., доцент, Научная лаборатория «Спутниковые телекоммуникационные системы»,
СибГУ им. М.Ф. Решетнева
gaipovke@yandex.ru

Демичева Алена Алексеевна

младший научный сотрудник, Научная лаборатория
«Спутниковые телекоммуникационные системы»,
СибГУ им. М.Ф. Решетнева, demichevaalena@yandex.ru

Демичев Максим Сергеевич

Инженер-конструктор по защите информации,
АО НПП «Радиосвязь»
mdemichev@yandex.ru

Абрамчик Даниил Дмитриевич

СибГУ им. М.Ф. Решетнева
abramchik_daniil@mail.ru

Крикунов Илья Леонидович

аспирант, младший научный сотрудник,
Научная лаборатория
«Спутниковые телекоммуникационные системы»,
СибГУ им. М.Ф. Решетнева
Zaybernev@mail.ru

Аннотация: Постановка задачи. Ввод спутниковых группировок на средней и низкой орбитах для предоставления услуг передачи данных, требует от проектировщиков такой системы определение ряда параметров при создании ее облика, таких как ширина полосы частот радиоканалов абонентских, фидерных и межспутниковых линий связи, мощность излучения сигналов, оценка возможности передачи заданного объема информации и другое. В данной статье приводится алгоритм формирования математической модели для оценки возможности передачи данных с заданной скоростью между источниками и приемниками и поиск необходимой полос частот каналов связи.

Цель. Разработка оптимизационной математической модели для решения задачи параметрического синтеза спутниковых систем и многопутевой маршрутизации, где в качестве критерия оптимальности выступает определение минимально необходимой скорости передачи данных межспутникового канала связи.

Используемые методы. Расчет осуществляется контурным методом, основанным на тензорном анализе телекоммуникационных сетей, согласно которому информационные потоки, проходящие через каналы связи, выражаются через линейную комбинацию потоков, циркулирующих в линейно-независимых циклах графа. Использование потоков в контурах позволяет уменьшить число переменных в математической модели.

Новизна. Состоит в адаптации контурного метода анализа к задаче параметрического синтеза, для поиска требуемых полос частот каждого канала связи.

Результат. Сформирована математическая модель для расчёта распределения потоков трафика в каналах связи системы, при введении известных информационных потоков от источников до получателей.

Практическая значимость. Предложенный алгоритм можно применять при разработке беспроводных систем передачи данных, в частности спутниковых систем.

Ключевые слова: маршрутизация, граф, контурный метод, телекоммуникационная сеть, распределение частот.

Благодарности: Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Введение

Спутниковые системы передачи данных используются в различных сферах жизни людей: передача данных между абонентами, обеспечение средствами навигации, технологии дистанционного зондирования Земли для изучения и постоянного мониторинга планеты, и другие. Космические системы, позволяют передавать данные любому абоненту, даже если проведение оптоволоконной связи является затруднительным из-за различных особенностей земной поверхности.

При объединении космических аппаратов (далее — КА), полученную сеть можно представить в виде системы беспроводной инфокоммуникационной связи, следовательно, для неё необходимо организовать определение маршрута передачи данных, который должен соответствовать определенным критериям, например, затрачивать минимальное количество ресурса сети или обеспечивать максимально возможную скорость передачи данных.

При определении структуры телекоммуникационной сети используются различные математические алгоритмы, что представлено в [1–12]. Оптимизация маршрута передачи трафика позволяет рассчитать самый быстрый и энергоэффективный маршрут с учетом заданных критериев [14–19]. При этом вопрос поиска маршрутов включает в себя множество отраслей, как передача информации по каналам связи телекоммуникационных сетей, как показано в [16, 20], так и логистические задачи [17, 21]. Актуальным вопросом также является взаимодействие и построение оптимальных маршрутов в беспроводных сетях связи [22] и между космическими и наземными сетями, что отражено в [23]. Таким образом вопрос поиска маршрутов является актуальным для решения множества различных задач.

Для решения задач маршрутизации, обычно, используются алгоритмы Дейкстры или Беллмана-Форда, од-

нако результатом их выполнения является однопутевой кратчайший маршрут от источника до приемника. В различных системах, нахождение всего одного маршрута будет не эффективным. В настоящее время актуальна задача многопутевой маршрутизации для систем связи, которая рассматривается в статьях [24, 25], а также для спутниковых систем связи [26–29].

Целью данной статьи является разработка оптимизационной математической модели для решения задачи параметрического синтеза спутниковых систем и многопутевой маршрутизации, в качестве критерия оптимальности выступает определение минимально необходимой скорости передачи данных межспутникового канала связи.

1. Постановка задачи

Дано:

1. Дана беспроводная сеть произвольной топологии $G = (V, E, D)$, где V — число узлов, E — число соединений (каналов связи), D — матрица, описывающая объем трафика, который необходимо передать от узлов источника (передатчика) до узлов стока (приемника).
2. Вектор L , описывающий стоимость организации канала связи.
3. Вектор p , определяющий предельно допустимую загрузку каналов связи.

Необходимо:

1. Определить маршруты прохождения трафика.
2. Определить минимально необходимую скорость передачи данных.

2. Ход решения

Узлы в сети могут быть, как узлами-источниками, так и узлами-стоками. Дополнительно введем каналы, описывающие трафик источника и получателя, проходящий

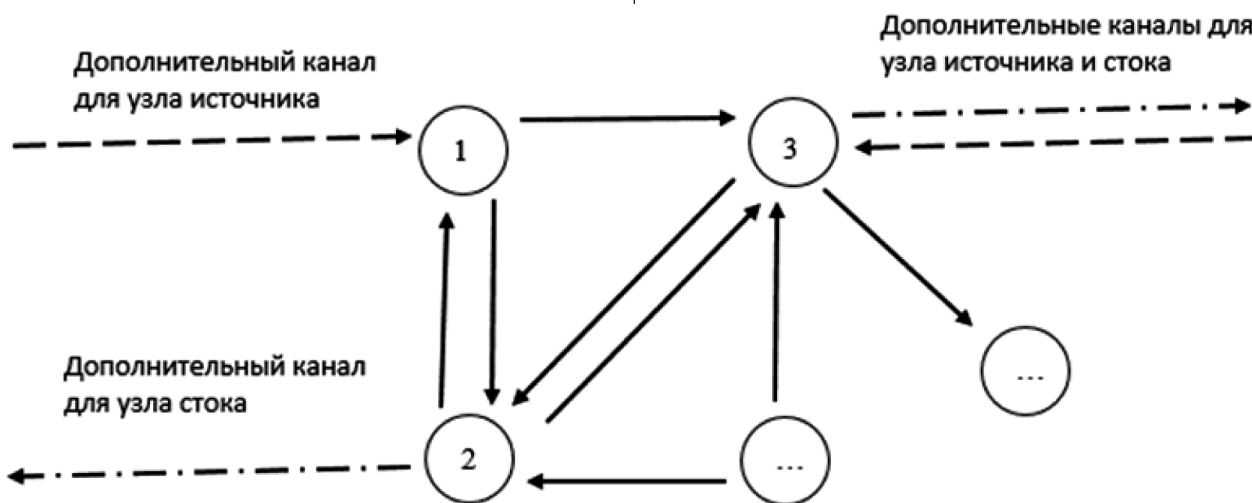


Рис. 1. Добавление дополнительных каналов для узлов источников и стоков

через эти узлы. Для узла источника канал будет направлен к узлу (для наглядности линия показана пунктиром), а для узла стока из узла (для наглядности линия показана штрих-пунктиром), Рис. 1.

Матрица запроса D определяет известный объем трафика, передаваемого от узла источника A_i по каналу B_k ($i \leq V, k \leq E$). В самом простом случае известен объем трафика, который поступает от узла источника, либо должен быть получен узлом получателем, однако в общем случае объем передаваемого трафика может быть определен для любого канала. Строки матрицы нумеруются согласно количеству узлов в сети, а столбцы — количеству каналов (E). На пересечении ячеек находятся численные значения величины объема трафика $d_{i,k}$ проходящего через рассматриваемый канал. Обозначения $B_1, B_2 \dots B_k$ на Рис. 2 описывают количество возможных источников трафика, который может быть передан в сети.

| | | число источников трафика | | | | | | |
|-----------------|-----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | B1 | B2 | ... | ... | ... | ... | Bk |
| узлы источников | A1 | d11 | d12 | ... | ... | ... | ... | d1k |
| | A2 | d21 | d22 | ... | ... | ... | ... | d2k |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | Ai | di1 | di2 | ... | ... | ... | ... | dik |

Рис. 2. Общий вид матрицы запросов D

Введем дополнительный узел, называемый «нулевым» узлом, который необходим только для проведения математических вычислений и не учитывается в реальной топологии сети. По известным алгоритмам определим дерево графов, которое представляет собой граф из V вершин и нулевой вершины, соединенных между собой. Соединения в данном графе будем называть ветвями. Соединения являются однонаправленными и определяются направлением движения трафика.

Если узел является и источником, и стоком, то одно соединение считается ветвью, другое — хордой.

Определим контуры в сети. Под контуром будем понимать такой замкнутый маршрут в сети, который включает в себя две и более ветвей графа и одно соединение (канал связи в исходной сети, который в дальнейшем будем обозначать хордой). Если узел является и источником, и стоком одновременно, то контур будет включать одну ветвь и одну хорду. Таким образом добавление одной хорды в дерево графов определяет один новый контур. Число источников обозначим S , число хорд (контуров) обозначим H . Для удобства вычислений пусть номер контура совпадает с номером хорды, которая его образует.

Контуры в сети описываются матрицей контуров C , рис. 3. Она имеет значения по вертикали — контуры в сети, по числу хорд в сети (в количестве H), по горизонтали — контуры в сети, по числу соединений в хорд (в количестве H) и ветви дерева графов (в количестве V). На пересечении указывается одно из значений: 0 — если ребро не входит в контур, 1 — если ребро входит в контур и направлено по направлению рассматриваемой хорды, -1 — если ребро входит в контур и направлено в противоположном направлении рассматриваемой хорды. Таким образом в левой части матрицы образуется единичная диагональная матрица.

| | | контуры в сети | | | | | ветви дерева графов | | | | | |
|----------------|-----|----------------|-----|-----|-----|----|---------------------|----|----|----|-----|----|
| | | x1 | x2 | x3 | ... | xj | y1 | y2 | y3 | y4 | ... | yi |
| контуры в сети | x1 | 1 | 0 | 0 | ... | 0 | | | | | | |
| | x2 | 0 | 1 | 0 | ... | 0 | | | | | | |
| | x3 | 0 | 0 | 1 | ... | 0 | | | | | | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | 0 | | | | | | |
| | xj | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | | | | |

Рис. 3. Матрица контуров C

Каждый контур имеет одну хорду, тогда поток, проходящий по хорде, определяет поток в контуре. Следовательно поток в контуре соответствует потоку в хорде. Таким образом зная потоки в хордах, можно определить потоки в ветвях. Из этого следует, что можно полностью описать потоки в графе, если известны потоки в хордах, что позволит уменьшить количество переменных для решения задачи синтеза сети.

Для каждого источника введем вектор состояний (1), описывающий поток по каналу связи от источника. Данный вектор состоит из элементов a_i-h_j , которые означают поток от a_i источника в хорде h_j , где i определяется числом источников ($i \leq S$), а j — числом хорд ($j \leq H$). Вектор состояний для каждого из источников не может быть отрицательным, в связи с тем, что в хордах не может протекать отрицательное значение трафика.

$$A_i = \begin{pmatrix} a_i-h_1 \\ a_i-h_2 \\ \dots \\ a_i-h_j \end{pmatrix} \tag{1}$$

Для каждого канала связи численно зададим вектор, который необходим для определения предельно допустимой загрузки каналов связи. Каждый из элементов данного вектора лежит в пределах $0 < \rho_j \leq 1$. Данный вектор задается численно в зависимости от условий задачи.

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

Также введем дополнительный вектор стоимости организации канала связи L (3), который будет описывать затраты при использовании каналов передачи данных. Каждый из элементов данного вектора не может быть отрицательным, либо равным нулю. Данный вектор задается численно в зависимости от условий задачи и требует дополнительных исследований.

$$L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \dots \\ L_j \end{pmatrix} \quad (3)$$

Входящий в систему трафик распределяется по ее ребрам, по одному ребру может проходить трафик от разных источников. Используя матрицу контуров сети и вектора состояний узла источника, можно определить объем трафика от каждого источника в определенном ребре.

Сумма потоков от каждого источника определяет общий поток в системе: $A = \sum_{i=1}^S (C^T A_i)$, где S — количество источников.

Для одного источника поток в каждом из ребер определяется как произведение матриц: $C^T A_i$.

Полученные значения равны u_i столбцу в матрице запросов D .

Определим целевую функцию. В общем виде целевая функция (4) имеет конечное множество переменных и критерий минимизации или максимизации.

$$F = \sum_{j=1}^H L_j \frac{\sum_{i=1}^V a_i - h_j}{\rho_j n_j} \rightarrow \min \quad (4)$$

Вектор n можно выбирать согласно стандарту беспроводной связи, используемому в системе передачи данных, например DVB-S2 [30], DVB-S2X [31], который показывает спектральную эффективность для заданного значения отношения сигнал/шум.

Используя составленные неравенства, уравнения и определенную целевую функцию, можно найти искомые значения переменных.

Заключение

В работе был составлен алгоритм поиска оптимальных маршрутов передачи данных в сети. Сеть представляется в виде графа с определенными параметрами каналов, узлами-приемниками и узлами-отправителями потока данных. Для задачи составлена целевая функция, минимизирующая общий поток в системе, и учитывающая стоимость, затрачиваемую на передачу по каждому из каналов связи. Линейная целевая функция может быть изменена под потребности определенной системы, однако работа алгоритма решения задачи синтеза не изменится. Алгоритм учитывает стоимость создания и обслуживания системы, за счет включения значения вектора стоимости в целевую функцию.

Разработка оптимизационной математической модели для решения задачи параметрического синтеза спутниковых систем свелась к задаче поиска наикратчайшего маршрута методами линейного программирования. Для формирования задачи затрачено $O(VES)$ времени, а для ее решения — $O(V^3S^3)$. Сложность решения определяется сложностью решения задачи линейного программирования.

Сравнить предложенный алгоритм с алгоритмами многопутевой и однопутевой маршрутизации однозначно нельзя, в связи с тем, что предложенный в данной статье алгоритм помимо маршрутов передачи данных определяет пропускные способности каналов связи, необходимые для обеспечения требуемой скорости передачи и качества обслуживания системы. Научные публикации, рассматриваемые по данной тематике [10, 26, 32], имеют нелинейные целевые функции, поэтому такие задачи имеют большую размерность. А также линейная задача всегда имеет решение, которое находится за конечное время.

Достоинствами алгоритма являются: возможность применения алгоритма к сетям различной структуры и количеству элементов сети; возможность использования различных целевых функций под определенные задачи инфокоммуникационных систем; алгоритм может быть использован как при проектировании новых сетей, так и при изменении параметров существующих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Листопад Н.И. Синтез оптимальных сетей телекоммуникаций с учетом обеспечения требований заданного качества обслуживания // Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. 2014. №2 (80). С. 159–168.
2. Моисеев О.В., Фам Т.Ф. Теоретико-графовая модель телекоммуникационной сети на основе триангуляционного разбиения // Телекоммуникации. 2018. №2. С. 12–16.
3. Соколова О.Д. Графовые модели для задач функционирования современных сетей передачи данных // Проблемы информатики. 2014. №4 (15). С. 61–68.
4. Евлевская Н.В., Хмелляр Н.А., Шинкарев С.А. Построение сети передачи данных как программно-конфигурируемой сети // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2021. №11. С. 272–278.
5. Журавель Е.П. Метод синтеза мультисервисной сети связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №10. С. 4–9.
6. Горай И.И., Журавлев Д.А., Буцев С.Ф. Синтез адаптивных сетей связи // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №3. С. 339–347.
7. Ángel Corberán, Isaac Plana, Miguel Reula, José M. Sanchis // On the Distance-Constrained Close Enough Arc Routing Problem. European Journal of Operational Research. Volume 291, Issue 1, 16 May 2021, Pages 32–51.
8. Задорожный В.Н., Захаренкова Т.Р. Оптимизация распределения каналов по узлам сетей с фрактальным трафиком // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. №2. С. 336–340.
9. Лисейкин Р.Е. Алгоритм зонирования региональной мультисервисной сети специального назначения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. №1. С. 79–83.
10. Марголис Б.И., Музанна М.М. Синтез магистральных телекоммуникационных сетей // Программные продукты и системы. 2014. №1. С. 162–168.
11. Дмитриев Г.А., Марголис Б.И., Музанна М.М. Синтез структуры абонентских телекоммуникационных сетей // Программные продукты и системы. 2014. №1. С. 158–162.
12. Гутковская О.Л., Пономарев Д.Ю. Применение ортогональной модели телекоммуникационной сети для решения задачи оптимального распределения трафика // Кибернетика и программирование. 2017. № 1. С. 11–29.
13. Хоборова В.П. Научно-технические предложения по реализации совместного управления трафиком и пропускной способностью мультисервисных сетей // Международный журнал перспективных исследований. 2018. Том 8. №1. С. 157–168.
14. Yash Vinayak, M. Vijayalakshmi. Optimization Algorithms to Reduce Route Travel Time // Proceedings of International Conference on Recent Trends in Computing. 2023, march. P. 311–321.
15. Zhiwen Zhang, The University of Tokyo, Hongjun Wang, Southern University of Science and Technology, Zipei Fan, The University of Tokyo // Route to Time and Time to Route: Travel Time Estimation from Sparse Trajectories. Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. 2023, march. P. 489–504.
16. Yingya Guo, Huan Luo, Zhiliang Wang, Xia Yin, Jianping Wu // Routing optimization with path cardinality constraints in a hybrid SDN. Computer Communications. Volume 165, 1 January 2021, Pages 112–121
17. De Paola, A., et al.: A multi-agent system for itinerary suggestion in smart environments. CAITrans. Intell. Technol. 6 (4), 377–393 (2021).
18. Yongjun Zhang, Jingjie Xin, Xin Li, Shanguo Huang // Overview on routing and resource allocation-based machine learning in optical networks. Optical Fiber Technology. Volume 60, December 2020.
19. Zheheng Rao, Yanyan Xu, Shaoming Pan // An intelligent routing method based on network partition. Computer Communications. Volume 160, 1 July 2020, Pages 25–33.
20. Akinori Yoshida, Yutaka Shimada, Takayuki Kimura // Efficient routing strategy with transmission history information and its surrogate analysis. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Volume 566, 15 March 2021.
21. Samuel M. Fischer // Locally optimal routes for route choice sets. Transportation Research Part B: Methodological. Volume 141, November 2020, Pages 240–266.
22. Reham Almesaeed, Ahmed Jedidi // Dynamic directional routing for mobile wireless sensor networks. Ad Hoc Networks. Volume 110, 1 January 2021.
23. Juan A. Fraire, Olivier De Jonckère, Scott C. Burleigh // Routing in the Space Internet: A contact graph routing tutorial. Journal of Network and Computer Applications. Volume 174, 15 January 2021.
24. Волков А.С., Баскаков А.Е. Разработка алгоритма многопутевой маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №9. С. 17–23.
25. Visnyk NTUU KPI Seriiia — Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2018, Iss. 72, pp. 32–41.
26. Иванов В.И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями // Системы управления, связи и безопасности 2018. №3. С. 69–105.
27. Н.В. Евлевская, Н.А. Хмелляр, С.А. Шинкарев Построение сети передачи данных как программно-конфигурируемой сети // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 272–278
28. А.И. Яшин Параметрический и структурный синтез пакетных мультисервисных сетей NGN // О-технический сборник. Выпуск 3 (142). 2014. С. 36–47.
29. О. В. Карсаев Концептуальная модель маршрутизации данных в многоспутниковой низкоорбитальной системе связи // Изв. Вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 10. С. 852–858
30. ETSI EN 302 307-1 V1.4.1 (2014-11).
31. ETSI EN 302 307-2 V1.3.1 (2021-07).
32. В.М. Вишневикий Теоретические основы проектирования компьютерных сетей // Москва: Техносфера, 2003. С. 512.

© Гаипов Константин Эдуардович (gaipovke@yandex.ru); Демичева Алена Алексеевна (demichevaalena@yandex.ru);
 Демичев Максим Сергеевич (rmdemichev@yandex.ru); Абрамчик Даниил Дмитриевич (abramchik_daniil@mail.ru);
 Крикунов Илья Леонидович (Zaybernev@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»