

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ВЕРОЯТНОСТИ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ

Курашев З. В.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2026-5-77-82

Ключевые слова: маршрутизация, алгоритм оптимизации, показатель эффективности, вероятность своевременной доставки пакетов.

Аннотация

Цель исследования заключается в анализе и разработке модели маршрутизации в сетях передачи данных, основанной на максимизации вероятности своевременной доставки сообщений, отличающейся от известных учетом времени задержки не только на линиях связи, но и в узлах коммутации.

Методы исследования: в работе использованы методы теории графов, теории вероятностей, математического моделирования. Сеть передачи данных представляется в виде ориентированного графа, в котором узлы соответствуют маршрутизаторам или коммутаторам, а ребра – каналам (линиям) связи. Для описания времени передачи по каналам используются случайные величины и вероятностные распределения задержек. В качестве критерия оптимизации применяется вероятность доставки сообщения в пределах предельно допустимого времени.

Результаты: в результате исследования сформирована математическая модель маршрутизации, в которой выбор пути осуществляется по критерию максимальной вероятности своевременной доставки сообщения. Получены аналитические соотношения для вычисления вероятности выполнения временного ограничения с учетом случайного характера задержек на узлах коммутации и каналах связи. Разработан алгоритм оптимизации маршрута, позволяющий выбирать путь, обеспечивающий наилучшее значение вероятностного критерия.

Практическая ценность: полученные результаты могут быть использованы при разработке адаптивных алгоритмов маршрутизации для сетей, в которых критически важна доставка сообщений в пределах установленного времени.

Введение

В современных сетях передачи данных, особенно в системах связи, функционирующих в условиях реального времени, важна не только доставка сообщения, но и его поступление в пределах предельно допустимого времени. Классические алгоритмы маршрутизации, как правило, ориентированы на минимизацию числа скачков, средней задержки или стоимости передачи, однако такие подходы не всегда обеспечивают высокую вероятность своевременной доставки сообщений в условиях случайных задержек, перегрузок и потерь пакетов. В связи с этим возрастает необходимость разработки и исследования моделей маршрутизации, основанных на вероятностной оценке выполнения временных ограничений, что позволяет повысить эффективность функционирования сетей в условиях неопределенности.

Современные сети передачи данных используются в различных прикладных областях, включая телекоммуникационные сети, беспроводные сенсорные сети, системы реального времени. В таких условиях особое значение приобретает

не только сам факт доставки сообщения, но и соблюдение требований по времени его передачи. Для многих приложений сообщение, поступившее с опозданием, теряет свою практическую ценность, даже если в конечном итоге было успешно доставлено.

Классические алгоритмы маршрутизации в основном ориентированы на такие критерии, как минимальное число переходов [1], минимальная средняя задержка [2], минимальная стоимость передачи [3] или максимальная надежность канала [4–5]. Однако в условиях случайного характера сетевых задержек, потерь пакетов, перегрузки узлов и изменяющихся параметров каналов связи такие подходы не всегда позволяют обеспечить высокую вероятность своевременной доставки сообщений [6–10]. В результате возникает необходимость применения новых методов маршрутизации, учитывающих вероятностную природу процессов передачи данных в сети.

Одним из перспективных направлений является моделирование маршрутизации на основе вероятности своевременной доставки

¹ Курашев Заур Валерьевич, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: ZKing07198@xmail.ru

сообщений. В этом случае маршрут оценивается не только по усредненным характеристикам, но и по вероятности того, что сообщение будет доставлено в пределах предельно допустимого времени. Такой подход особенно актуален для сетей, функционирующих в условиях неопределенности и предъявляющих повышенные требования к качеству обслуживания.

В современных сетях передачи данных классический выбор маршрута по критерию минимального среднего времени задержки уже не всегда обеспечивает требуемое качество обслуживания. Для систем реального времени существенно не просто уменьшить среднюю задержку, а максимизировать вероятность того, что сообщение будет доставлено за время не превышающее допустимое. Именно поэтому в моделях маршрутизации все чаще используется вероятностный критерий своевременной доставки:

$$P\{T_3 \leq T_{\text{доп}}\}, \quad (1)$$

где T_3 – время задержки информационного пакета, а $T_{\text{доп}}$ – допустимое предельное время задержки.

Такой подход заключается в том, что маршрут оценивается не по одному усредненному показателю, а по распределению задержек на каждом канале и по их совокупному влиянию на итоговую вероятность доставки в срок. Это важно, поскольку маршрут с меньшей средней задержкой может иметь большую дисперсию и, следовательно, чаще нарушать временные ограничения, чем более «стабильный» путь с немного большим средним временем передачи.

При вероятностном моделировании сеть обычно представляют ориентированным графом $G = (V, E)$, где вершины соответствуют узлам коммутации (маршрутизации), а ребра – каналам (линиям) связи. Каждому ребру сопоставляются случайные параметры: задержка передачи, вероятность потери пакета, доступная пропускная способность и иногда стоимость использования канала. Тогда задача маршрутизации формулируется как поиск маршрута μ , максимизирующего вероятность выполнения ограничения

$$\max_{\mu \in M(s,d)} P\{T_3 \leq T_{\text{доп}}\}, \quad (2)$$

где $M(s,d)$ – множество путей между источником s и получателем d .

Для каждой дуги $e = (i,j) \in E$ задаются следующие параметры: X_{ij} – случайная величина задержки на канале; q_{ij} – вероятность успешной передачи за одну попытку; $p_{ij} = 1 - q_{ij}$ – вероятность потери; c_{ij} – стоимость использования канала; b_{ij} – доступная пропускная способность.

Для пары узлов «источник – получатель» (s,d) требуется выбрать маршрут $\mu \in M_{sd}$, обеспечивающий максимальную вероятность своевременной доставки сообщения при заданном $T_{\text{доп}}$.

Если маршрут μ состоит из n последовательно проходящих каналов, то задержка определяется суммой случайных задержек на отдельных участках:

$$T_3 = \sum_{k=1}^n X_k, \quad (3)$$

где X_k – случайная величина задержки на узле коммутации.

Если задержки на участках считаются независимыми случайными величинами, то время задержки информационного пакета на маршруте определяется как сумма задержек на его узлах и ребрах. В этом случае вероятность своевременной доставки может быть получена через свертку распределений или через аппроксимации. В более общих моделях учитывают не только задержку, но и вероятность успешной передачи на каждом канале, что позволяет оценивать уже не просто временную, а совместную надежно-временно-временную характеристику маршрута.

При предположении независимости задержек в узлах коммутации и каналах связи получаем распределение суммы случайных величин. Для односкачковой задержки принимается экспоненциальное распределение, а для суммы неодинаковых экспоненциальных величин используется гиперэкспоненциальное или нормальное (гауссовское) распределение.

Если

$$X_k \sim \text{Exp}(\lambda_k), \quad (4)$$

то

$$E[X_k] = \frac{1}{\lambda_k}, \quad \text{Var}(X_k) = \frac{1}{\lambda_k^2}. \quad (5)$$

Тогда для маршрута:

$$E[T_\mu] = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\lambda_k}; \quad (6)$$

$$\text{Var}(T_\mu) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\lambda_k^2}. \quad (7)$$

Эти выражения удобны для сравнения маршрутов не только по среднему времени, но и по устойчивости задержки. Именно различие по дисперсии объясняет, почему маршрут с меньшим средним временем может проигрывать по вероятности своевременной доставки.

Вероятность выполнения предельно допустимого времени доставки сообщения от источника до получателя для маршрута μ определяется как:

$$P_d(T_d) = P\{T_3 \leq D\} = F_{T_3}(T_{\text{доп}}), \quad (8)$$

где $F_{T_3}(T_{\text{доп}})$ – функция распределения сквозной задержки.

Для гиперэкспоненциального случая:

$$P_d(T_d) = F_{T_3}(T_{\text{доп}}) = 1 - \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i T_d} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i}. \quad (9)$$

Учитывая, что время доставки сообщения соответствует максимальному времени доставки пакета из состава пакетов этого сообщения, то можно записать соотношение $P\{t_c \leq \tau\} = P^l\{t_n \leq \tau\}$ где l – длина сообщения (выраженная в числе пакетов). Отсюда следует, что в рамках рассматриваемых допущений требования к времени доставки сообщения можно преобразовать к времени доставки пакета [33]. С учётом этого в качестве показателя принимается вероятность своевременной доставки информационных пакетов. Распределение (9) дает возможность вычислять вероятность доставки пакета до момента предельно допустимого времени доставки сообщения от источника до получателя и использовать ее как целевую метрику при выборе маршрута.

Алгоритм оптимизации

Шаг 1. Ввод исходных данных

Задаются: топология сети $G = (V, E)$; источник s и приемник d ; распределения задержек на узлах коммутации и каналах (линиях) связи; ограничения по стоимости, числу переходов или пропускной способности.

Шаг 2. Формирование множества допустимых маршрутов

Строится множество:

$$M_{sd} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}.$$

На практике все возможные маршруты обычно не перебираются полностью, потому что число путей быстро растет. Поэтому используют либо ограничение на длину маршрута, либо поиск только k лучших, либо динамическое программирование. Работы по этой теме прямо рассматривают локальные и итерационные алгоритмы, которые избегают полного перебора и постепенно улучшают таблицы маршрутизации.

Шаг 3. Вычисление задержки для каждого маршрута

Для каждого маршрута μ строится распределение задержки по формуле (9).

Если предполагается, что на каждом ребре задержка экспоненциальна, формула (4) то для маршрута получаем:

$$E[T_\mu] = \sum_{e \in \mu} \frac{1}{\lambda_e}, \quad \text{Var}(T_\mu) = \sum_{e \in \mu} \frac{1}{\lambda_e^2}.$$

Шаг 4. Вычисление вероятности своевременной доставки

Для каждого маршрута вычисляется

$$P_d(T_d) = P\{T_3 \leq T_d\} = F_{T_3}(T_d),$$

если задержки гиперэкспоненциальны, вероятность можно записать как (9). Если аналитическое вычисление затруднено, используется имитационная оценка:

$$\hat{P}_d(T_d) = \frac{N_{\mu}^{\text{ontime}}}{N},$$

где N – общее число прогонов, а N_{μ}^{ontime} – число успешных доставок информационных пакетов по маршрутам μ .

С точки зрения имитационного моделирования исследование алгоритмов маршрутизации обычно включает построение сетевой топологии, задание вероятностных законов для задержек и потерь, генерацию потоков сообщений и сравнение алгоритмов по нескольким метрикам: вероятности своевременной доставки, средней задержке, доле потерянных пакетов, нагрузке на сеть и устойчивости при росте трафика.

Шаг 5. Проверка ограничений

Для каждого маршрута проверяются ограничения:

$$C_\mu = \sum_{e \in \mu} c_e \leq C_{\max},$$

$$|\mu| \leq H_{\max},$$

$$P_d(T_d) \geq P_{\min}.$$

Если маршрут не удовлетворяет ограничениям, он исключается из рассмотрения.

Шаг 6. Выбор оптимального маршрута

Среди допустимых маршрутов выбирается маршрут с максимальным значением целевой функции:

$$\mu^* = \arg \max_{\mu \in M_{sd}} F(\mu).$$

Результат – это маршрут, который дает наибольшую вероятность своевременной доставки сообщения.

Алгоритм оптимизации маршрутизации на основе вероятности своевременной доставки сообщений состоит в последовательной оценке всех допустимых маршрутов между узлами источника и назначения, вычислении для каждого маршрута распределения задержки, определении вероятности выполнения ограничения и последующем выборе маршрута, максимизирующего целевую функцию.

Для сравнения возьмем иллюстративный расчетный пример.

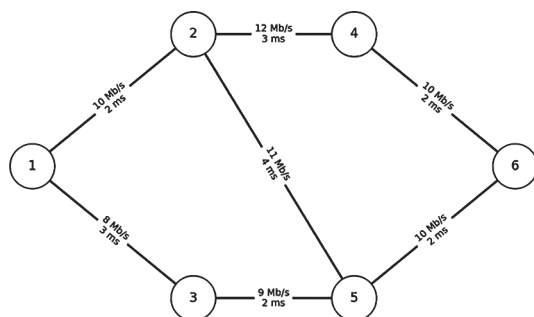


Рис. 1. Пример сети передачи данных для задачи маршрутизации

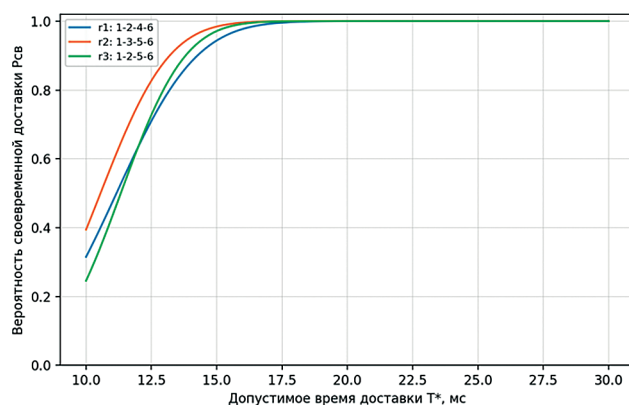


Рис. 2. Зависимость вероятности своевременной доставки от допустимого порога времени

Рассмотрим сеть из 6 узлов и 3 альтернативных маршрутов от узла 1 к узлу 6.

Для каждого канала заданы задержка распространения и интенсивность обслуживания. Порог своевременной доставки принят 18 мс.

Маршрут	Состав маршрута	Параметры участков
r1	1–2–4–6	(2 мс; 0.90), (3 мс; 1.10), (2 мс; 1.00)
r2	1–3–5–6	(3 мс; 1.20), (2 мс; 0.95), (2 мс; 1.05)
r3	1–2–5–6	(2 мс; 0.90), (4 мс; 1.15), (2 мс; 1.05)

На примере для каждого участка указаны пары задержки в миллисекундах и интенсивности обслуживания в пак/мс.

Заключение

Проведённый анализ показывает, что классические алгоритмы маршрутизации эффективны при решении задач связности и базовой оптимизации, однако не всегда адекватны для обслуживания потоков с жёсткими временными ограничениями. При переходе от критерия кратчайшего пути к критерию вероятности своевременной доставки возникает новая, более прикладная постановка задачи. Она позволяет учитывать случайный характер задержек, потерь и перегрузок на маршрутах прохождения информационных пакетов.

Преимущество вероятностного подхода состоит в том, что он лучше отражает реальную природу сети как случайной среды. Вместо жесткого предположения о фиксированных задержках он позволяет оценивать риск нарушения временных требований и выбирать маршрут с учетом компромисса между стоимостью, надежностью и временной устойчивостью. Это особенно важно для управления на сетях, где ценность сообщения резко падает после истечения допустимого времени доставки.

Таким образом, моделирование маршрутизации на основе вероятности своевременной доставки сообщений представляет собой развитие классических методов QoS-маршрутизации. В таких моделях ключевым объектом оптимизации становится не просто путь с минимальной задержкой, а путь с максимальной вероятностью удовлетворения временных ограничений. Дальнейшее развитие этой области связано с применением стохастических моделей для адаптивного выбора маршрутов в условиях изменяющейся нагрузки и нестабильных каналов связи.

Литература

- Guoqing Tian, Yanmei Jia, Suzhi Cao, Xiaohua Wang, Hongen Zhong An Improved Minimum Hop Count Routing for LEO Mega-Constellations // ICNCC '23: Proceedings of the 2023 12th International Conference on Networks, Communication and Computing. – 2024. – Pp.22–31.
- Fu X., Modiano E. A Learning Approach to Minimum Delay Routing in Stochastic Queueing Networks // IEEE INFOCOM 2023 – IEEE Conference on Computer Communications. – DOI: 10.1109/INFOCOM53939.2023.10229039.
- Swaminathan A., Chaba M., Sharma D. K., Ghosh U. GraphNET: Graph Neural Networks for Routing Optimization in Software Defined Networks // Computer Communications. – 2021. – Vol. 178. – Pp. 169–182. – DOI: 10.1016/j.comcom.2021.07.025.
- Liang Q., Liu X., Zhang Y. et al. A Dynamic Source Routing Protocol Based on Path Reliability and Monitoring Repair Mechanism // – 2021. – DOI:10.1371/journal.pone.0251548.
- Lyu J. et al. Reliable Route Selection for Wireless Sensor Networks. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.3390/s21217254>.
- Чуднов А. М., Кирик Д. И., Курашев З. В. Оптимизация распределения информационных потоков в информационной системе по показателю вероятности своевременной доставки сообщений // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2017. – № 2. – С. 41–49. – EDN: ZCSAYZ.

7. Чуднов А. М., Курашев З. В. Принципы формирования маршрутных таблиц на основе оптимизации распределения потоков в сети передачи данных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т.9. – № 6. – С. 46–51. – EDN: YPPYSR.
8. Чуднов А. М., Путилин А. Н., Попов А. И. Комплексное управление маршрутизацией пакетов и режимами работы радиосредств в неоднородной сети передачи данных // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2019. – № 1. – С. 46–56. – EDN: SFUSML.
9. Дымарский Я. С., Крутикова Н. П., Яновский Г. Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. М.: Связь и бизнес. – 2003. – 384 с. – ISBN 5-93533-014-8.
10. Чуднов А. М. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов / А. М. Чуднов, О. А. Губская, Я. В. Кичко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 117–124. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-117-124.

MODELING OF THE ROUTING PROBLEM IN THE DATA TRANSMISSION NETWORK BY THE PROBABILITY OF TIMELY DELIVERY OF MESSAGES

Kurashev Z. V.²

Keywords: routing, optimization algorithm, efficiency indicator, probability of timely delivery of packets.

Abstract

The purpose of the study is to analyze and develop a routing model in data transmission networks based on maximizing the probability of timely delivery of messages, which differs from the known ones by considering the delay time not only on communication lines, but also in switching nodes.

Research methods: the author uses the methods of graph theory, probability theory, and mathematical modeling. The data transmission network is represented as a directed graph in which nodes correspond to routers or switches, and edges correspond to communication channels (lines). Random variables and probabilistic delays distributions are used to describe the transmission time through channels.

Results: as a result of the study, a mathematical routing model was formed, in which the path is selected according to the criterion of the maximum probability of timely delivery of the message. Analytical ratios were obtained to calculate the probability of meeting the time limit, considering the random nature of delays at switching nodes and communication channels. An algorithm for route optimization was developed, which allows you to choose the path that provides the best value of the probabilistic criterion.

Practical value: the results obtained can be used in the development of adaptive routing algorithms for networks in which the delivery of messages within the set time is critical.

References

1. Guoqing Tian, Yanmei Jia, Suzhi Cao, Xiaohua Wang, Hongen Zhong An Improved Minimum Hop Count Routing for LEO Mega-Constellations // ICNCC '23: Proceedings of the 2023 12th International Conference on Networks, Communication and Computing. – 2024. – Pp. 22–31.
2. Fu X., Modiano E. A Learning Approach to Minimum Delay Routing in Stochastic Queueing Networks // IEEE INFOCOM 2023 – IEEE Conference on Computer Communications. – DOI: 10.1109/INFOCOM53939.2023.10229039.
3. Swaminathan A., Chaba M., Sharma D. K., Ghosh U. GraphNET: Graph Neural Networks for Routing Optimization in Software Defined Networks // Computer Communications. – 2021. – Vol. 178. – Pp. 169–182. – DOI: 10.1016/j.comcom.2021.07.025.
4. Liang Q., Liu X., Zhang Y. et al. A Dynamic Source Routing Protocol Based on Path Reliability and Monitoring Repair Mechanism // – 2021. – DOI:10.1371/journal.pone.0251548.
5. Lyu J. et al. Reliable Route Selection for Wireless Sensor Networks. 2021. – URL: <https://doi.org/10.3390/s21217254>.
6. Chudnov A. M., Kirik D. I., Kurashev Z. V. Optimizatsiya raspredeleniya informatsionnykh potokov v informatsionnoy sisteme po pokazatelyu veroyatnosti svoevremennoy dostavki soobshchenij // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy. – 2017. – No. 2. – Pp. 41–49. – EDN: ZCSAYZ.
7. Chudnov A. M., Kurashev Z. V. Principy formirovaniya marshrutnykh tablits na osnove optimizatsii raspredeleniya potokov v seti peredachi dannykh // Nauchnye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli. – 2017. – V. 9. – No. 6. – Pp. 46–51. – EDN: YPPYSR.
8. Chudnov A. M., Putilin A. N., Popov A. I. Kompleksnoe upravlenie marshrutizatsiej paketov i rezhimami raboty radiosredstv v neodnorodnoy seti peredachi dannykh // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy. – 2019. – No. 1. – Pp. 46–56. – EDN: SFUSML.

² Zaur V. Kurashev, Ph.D. of Technical Sciences, Head of the Research Laboratory of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow Region, Mytishchi, Russia. E-mail: Zking07198@gmail.ru

9. Dymarskij Ya. S., Krutikova N. P., Yanovskij G. G. Upravlenie setyami svyazi: principy, protokoly, prikladnye zadachi. M.: Svyaz' i biznes. – 2003. – 384 p. – ISBN 5-93533-014-8.
10. Chudnov A. M. Metodika analiza veroyatnostno-vremennyh harakteristik obmena soobshcheniyami v komplekse bespilotnyh letatel'nyh apparatov / A. M. Chudnov, O. A. Gubskaya, Ya. V. Kichko // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2021. – No. 11. – Pp. 117–124. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-117-124.

