



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-45-53>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2

QoS МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Н.И. ЛИСТОПАД¹, О.А. ЛАВШУК²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. С ростом требований к качеству обслуживания (QoS) в современных мультисервисных сетях все большее внимание уделяется средствам маршрутизации. С переходом к сетям нового поколения вопросы совершенствования алгоритмов и протоколов маршрутизации представляются особенно актуальными. Существующие алгоритмы маршрутизации разработаны достаточно полно и в целом функционируют эффективно в том случае, если оптимизация выбора маршрута осуществляется по одному параметру. В случае же многокритериальной маршрутизации специалисты сталкиваются с проблемой сведения многих критерий к единичному путем аддитивной свертки. Реже применяется мультипликативная свертка, так как не всегда возможно применить мультипликативное преобразование к реальным физическим процессам. Проблема применения мультипликативной свертки к различным требованиям заданного качества обслуживания состоит в выборе весовых коэффициентов для каждого из параметров. В данной работе проводится анализ выбора оптимального пути при многокритериальной маршрутизации с учетом весовых коэффициентов и стоимостных параметров на основании вышеизложенного двухуровневого подхода. Приводятся результаты численного моделирования поиска оптимального пути при различных значениях весовых коэффициентов и коэффициентов стоимости. Показано, что при выборе пути при многокритериальной оптимизации необходимо коэффициенты аддитивной свертки выбирать как произведение непосредственно весовых коэффициентов и коэффициентов стоимости. Установлено, что значение коэффициента вероятности прохождения пакетов влияет в большей степени на выбор оптимального пути, чем значения коэффициентов при параметрах задержки, вариации задержки и полосы пропускания.

Ключевые слова: качество обслуживания, задержка, джиттер (вариации задержки), полоса пропускания, вероятность потери (прохождения) пакетов, сервис-ориентированная архитектура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Листопад Н.И., Лавшук О.А. QoS маршрутизация в сетях телекоммуникаций. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 45-53.

QoS ROUTING IN TELECOMMUNICATIONS NETWORKS

NIKOLAI I. LISTOPAD¹, OLGA A. LAVSHUK²

¹*Belarrussian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarusian State Academy of Communication (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 14 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. With the increasing demand for quality of service (QoS) in today's multiservice networks, more and more attention is paid to the routing facilities. With the transition to new generation networks, the issues of improving routing algorithms and protocols seem to be especially relevant. The existing routing algorithms have been developed quite fully and, on the whole, function effectively if the optimization of the route selection is carried out according to one parameter. In the case of multi-criteria routing, specialists are faced with the problem of reducing many criteria to a single one by means of additive convolution. Less commonly, multiplicative convolution is used, since it is not always possible to apply multiplicative transformation to real physical processes. The problem of applying multiplicative convolution to various QoS requirements is to choose the weight coefficients for each of the parameters. In this paper, we analyze the choice of the optimal path for multi-criteria routing, taking into account the weight coefficients and cost parameters on the basis of the above two-level approach. The results of numerical modeling of the search for the optimal path for various values of weight coefficients and cost coefficients are presented. It is shown that when choosing a path for multi-criteria optimization, it is necessary to choose the coefficients of the additive convolution as the product of the weight coefficients and the cost coefficients directly. It has been found that the value of the probability of packet transmission affects to a greater extent the choice of the optimal path than the values of the coefficients for the parameters of delay, delay variation, and bandwidth.

Keywords: quality of service, delay, jitter (delay variations, bandwidth, probability of packet loss (passage), service-oriented architecture.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Listopad N.I., Lavshuk O.A. QoS Routing in Telecommunications Networks. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 45-53.

Введение

С ростом требований к качеству обслуживания (QoS) в современных мультисервисных сетях все большее внимание уделяется средствам маршрутизации. Маршрутизация, являясь одним из наиболее действенных механизмов обеспечения заданного качества обслуживания, на практике же выполняет данную функцию рамках существующих протоколов маршрутизации не всегда эффективно. С переходом к сетям нового поколения вопросы совершенствования алгоритмов и протоколов представляются особенно актуальными. Существующие алгоритмы маршрутизации разработаны достаточно полно и в целом функционируют эффективно в том случае, если оптимизация выбора маршрута осуществляется по одному параметру. В случае же многокритериальной маршрутизации специалисты сталкиваются с проблемой сведения многих критериев к единичному путем аддитивной свертки. Реже применяется мультипликативная свертка, так как не всегда возможно применить мультипликативное преобразование к реальным физическим процессам. Проблема применения мультипликативной свертки к различным требованиям заданного качества обслуживания состоит в выборе весовых коэффициентов для каждого из параметров. На сегодняшний день четкой методики выбора таких коэффициентов не разработано, и решение имеется лишь для некоторых частных случаев в форме рекомендаций. Проблема усложняется еще и тем, что при выборе того или иного пути наряду с техническими требованиями возникает необходимостью учета стоимостных показателей. Для ее решения

более эффективным представляется подход, базирующейся на сервис-ориентированной архитектуре, которая представляется в виде двух уровней: а) уровень резервирования необходимых телекоммуникационных ресурсов для обеспечения заданного качества обслуживания; б) уровень предоставления соответствующих телекоммуникационных услуг для обеспечения требуемого качества обслуживания.

Моделирование процессов выбора оптимального пути

Рассмотрим процесс передачи данных между узлами в телекоммуникационной сети, представленной в виде графа $G(V, E)$ с 9 узлами сети, где V – множество узлов сети, E – множество дуг $e_{i,j}$, соединяющих узлы $i, j \in V$, телекоммуникационной сети (рис. 1) [1–3].

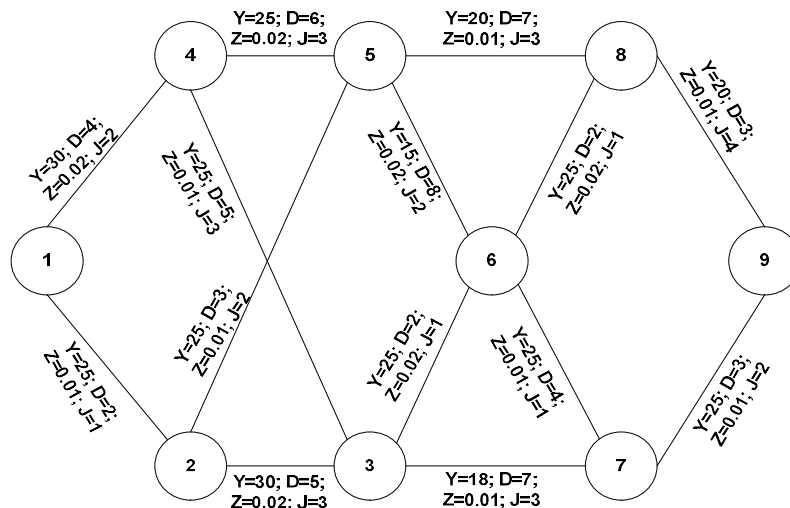


Рис. 1. Схема сети телекоммуникаций для 9 узлов
Fig. 1. Telecommunication network diagram for 9 nodes

В качестве QoS-параметров каждого ребра графа выделены полоса пропускания Y_e , задержка D_e , вариация задержки J_e и вероятность потери пакетов Z_e . На рис. 1 численные значения QoS-параметров представлены в относительных единицах.

Для каждого из возможных путей из узла источника s в узел получения t справедливы следующие соотношения [2]:

$$Y_{s,t} = \max_{e \in P} \{Y_e\}; D_{s,t} = \sum_{e \in P} D_e; J_{s,t} = \sum_{e \in P} J_e; Z_{s,t} = 1 - \prod_{e \in P} (1 - Z_e). \quad (1)$$

Для удобства дальнейшего анализа вероятность потери пакетов Z_e будем рассматривать как логарифм вероятности прохождения пакетов $X_e = \ln(1 - Z_e)$ [4]. Такой подход удобен тем, что значение данного параметра на всем пути маршрутизации можно вычислять суммированием:

$$X_{s,t} = \sum_{e \in p} X_e. \quad (2)$$

Если на всем пути p для каждого QoS-параметра будут выполнены ограничения вида

$$Y_{s,t} \geq Y^{\min}; X_{s,t} \geq X^{\max}; D_{s,t} \leq D^{\max}; J_{s,t} \leq J^{\max}, \quad (3)$$

то такой путь называют QoS-осуществимым путем.

Учет нескольких QoS-параметров и различных требований приложений к значениям этих параметров значительно усложняет задачу маршрутизации. Для ее решения более эффективным

представляется подход, базирующейся на сервис-ориентированной архитектуре (SOA) [4]. Следуя методике, изложенной в [4], SOA можно представить в виде двух уровней:

- а) уровень резервирования необходимых телекоммуникационных ресурсов для обеспечения заданного качества обслуживания;
- б) уровень предоставления соответствующих телекоммуникационных услуг для обеспечения требуемого качества обслуживания.

Другими словами, необходимо выбрать такой путь (пути), чтобы было обеспечено выполнение основных QoS-требований вида (3) [4].

Пусть $P_{fes}(s,t)$ есть множество QoS-осуществимых путей из s в t . Тогда проблема QoS-маршрутизации может быть сформулирована как модель оптимальной маршрутизации, рассматриваемая на множестве QoS-осуществимых путей $P_{fes}(s,t)$.

Для решения задачи можно использовать эвристический алгоритм, представляющий собой модификацию алгоритма Дейкстры [2].

Предложенная далее модификация алгоритма Дейкстры позволяет выбирать кратчайший путь не только с учетом требований заданного качества обслуживания и среди множества QoS-осуществимых путей, но и также учитывать стоимость выбираемого маршрута передачи информации.

Для нахождения оптимального пути будем использовать следующую свертку:

$$r = \max(w_Y \frac{Y_{s,t} - Y^{\min}}{Y^{\max} - Y^{\min}} + w_D \frac{D^{\max} - D_{s,t}}{D^{\max} - D^{\min}} + w_J \frac{J^{\max} - J_{s,t}}{J^{\max} - J^{\min}} + w_X \frac{X_{s,t} - X^{\min}}{X^{\max} - X^{\min}}). \quad (4)$$

В формуле (4) значения $D^{\min} = 14$, $J^{\min} = 7$, $X^{\max} = \ln(1 - 0,12) = -0,12783$ выбраны исходя из рассчитанных значений QoS-параметров в рассматриваемой топологии сети рис. 1.

Задачей второго уровня является предоставление из набора зарезервированных самих услуг [1].

$$r = \min \sum_{e \in P} \sum_{k=1}^m k_p(e) x_p(e) + d_k(e) L_k(e), \quad (5)$$

где $k_p(e)$ – стоимость выбора пути на всем отрезке от s до t ; $x_p(e) \in (0,1)$; $d_k(e)$ – единица дополнительной стоимости, необходимой для обеспечения QoS-требования; $L_k(e)$ – емкости зарезервированных телекоммуникационных ресурсов (в относительных единицах), необходимых для обеспечения заданного качества обслуживания: полосы пропускания, величины задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов; m – количество QoS требований, в нашем случае $m = 4$. Для $L_k(e)$ справедливо следующее: если $x_p(e) = 0$, то $L_k(e) = 0$; если $x_p(e) = 1$, то $L_k(e) \geq 0$ [4].

Дальнейшая модификация алгоритма выбора кратчайшего пути состоит в том, чтобы из всех возможных путей, являющихся кратчайшими и удовлетворяющих требованиям заданного качества обслуживания QoS, выбрать такие из них, которые при этом обладали бы минимальной стоимостью. С учетом требований минимальной стоимости формула (4) может быть модифицирована следующим образом:

$$r = w_Y \cdot d_Y \cdot \frac{Y_{s,t} - Y^{\min}}{Y^{\max} - Y^{\min}} + w_D \cdot d_D \cdot \frac{D^{\max} - D_{s,t}}{D^{\max} - D^{\min}} + w_J \cdot d_J \cdot \frac{J^{\max} - J_{s,t}}{J^{\max} - J^{\min}} + w_X \cdot d_X \cdot \frac{X_{s,t} - X^{\min}}{X^{\max} - X^{\min}}, \quad (6)$$

где d_i – стоимости резервирования (использования) соответствующих телекоммуникационных ресурсов. Таким образом, при примерно одинаковых значениях функции, определяющей выбор кратчайшего пути, выбирается тот путь, стоимость которого минимальна. При этом справедливо следующее соотношение: если $k_{p1}(e) < k_{p2}(e)$, то $d_{k1}(e) > d_{k2}(e)$. Другими словами, чем меньше стоимость, тем больше коэффициент $d_k(e)$.

Алгоритм нахождения оптимального пути состоит в следующем: выбор и ввод предельных значений параметров QoS (полосы пропускания, задержки, джиттера, вероятности прохождения пакетов); нахождение свертки функции r с целью определения множества QoS-осуществимых путей.

Введем граничные значения QoS-параметров для топологии пути рис. 1: $D^{\max} = 25$, $\gamma^{\min} = 19$, $\gamma^{\max} = 28$, $J^{\max} = 20$, $X^{\min} = \ln(1-0,1) = -0,10536$. В результате расчета было выбрано шесть путей, удовлетворяющих требованиям заданного качества обслуживания (3): P3(1-2-5-8-9), P6(1-2-3-6-7-9), P7(1-2-3-6-8-9), P9(1-4-5-8-9), P11(1-4-3-6-7-9), P12(1-4-3-6-8-9).

Результаты расчета QoS-параметров для выбранных путей и предельных значений параметров QoS представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет QoS-параметров
Table 1. The calculation of QoS parameters

Путь (Path)	D	γ	J	X
P3(1-2-5-8-9)	15	20	7	-0,0402
P6(1-2-3-6-7-9)	16	25	8	-0,0706
P7(1-2-3-6-8-9)	14	20	7	-0,0807
P9(1-4-5-8-9)	20	20	8	-0,0605
P11(1-4-3-6-7-9)	18	25	9	-0,0706
P12(1-4-3-6-8-9)	16	20	8	-0,0807

Численные эксперименты по выбору оптимального пути

Выполним расчет аддитивной свертки (4) при различных значениях весовых коэффициентов (табл. 2). Оптимальный путь для наглядности выделен в таблице темным цветом. Выбор весовых коэффициентов осуществлялся произвольным образом с учетом того, что их сумма не должна быть больше единицы. Основная цель построения табл. 2 и 3 – выбор путей по топологии рис. 1, отвечающих требованиям заданного качества обслуживания по пропускной способности, задержке, вариации задержки и вероятности потерь.

Таблица 2. Результаты расчета аддитивной свертки при изменении весовых коэффициентов
Table 2. The results of calculating the additive convolution when changing the weight coefficients

w_γ	w_D	w_J	w_X	P3	P6	P7	P9	P11	P12
0,7	0,1	0,1	0,1	-0,0213	0,4859	0,1681	0,0159	0,4600	0,1422
0,1	0,3	0,3	0,3	-0,2860	0,1244	0,2820	-0,1744	0,0468	0,2044
0	0,8	0,1	0,1	0,5373	0,5920	0,7903	0,2564	0,4388	0,6372
0,6	0,2	0,2	0	0,4485	0,7483	0,4667	0,3422	0,6965	0,4149
1	0	0	0	0,1111	0,6667	0,1111	0,1111	0,6667	0,1111
0	1	0	0	0,9091	0,8182	1,0000	0,4545	0,6364	0,8182
0	0	1	0	1,0000	0,9231	1,0000	0,9231	0,8462	0,9231
0	0	0	1	-2,8995	-1,5487	-1,0970	-1,9959	-1,5487	-1,0970
0,5	0,5	0	0	0,5101	0,7424	0,5556	0,2828	0,6515	0,4646
0	0,5	0,5	0	0,9545	0,8706	1,0000	0,6888	0,7413	0,8706
0	0	0,5	0,5	-0,9497	-0,3128	-0,0485	-0,5364	-0,3513	-0,0869
0,5	0	0	0,5	-1,3942	-0,4410	-0,4929	-0,9424	-0,4410	-0,4929
0,25	0,25	0,25	0,25	-0,2198	0,2148	0,2535	-0,1268	0,1501	0,1889
0,33	0,33	0,33	0	0,6667	0,7946	0,6967	0,4913	0,7092	0,6113
0	0,33	0,33	0,33	-0,3268	0,0635	0,2980	-0,2040	-0,0218	0,2126
0,33	0,33	0	0,33	-0,6202	-0,0211	0,0047	-0,4720	-0,0811	-0,0553

Из результатов, приведенных в табл. 2, можно заметить, что чаще в качестве оптимального пути для заданной топологии и предельных значениях параметров QoS выбираются пути P6(1-2-3-6-7-9) и P7(1-2-3-6-8-9). Также следует отметить, что, когда весовой коэффициент для пропускной способности является наибольшим, можно выбрать любой путь из двух удовлетворяющих критериям P6(1-2-3-6-7-9) или P11(1-4-3-6-7-9), так как эти пути имеют максимальную пропускную способность (табл. 1).

С учетом значений стоимостных коэффициентов с помощью алгоритма Дейкстры выполним расчет аддитивной свертки по формуле (6) (табл. 3). Значения d_j были выбраны произвольным образом с учетом того, что сумма стоимостных коэффициентов не должна превышать 1. Оптимальные пути выделены в таблице темным цветом (табл. 3-4).

Таблица 3. Результаты расчета аддитивной свертки при изменении стоимостных коэффициентов:
 $d_Y = 0,2; d_D = 0,3; d_J = 0,3; d_X = 0,2$

Table 3. The results of calculating the additive convolution when changing the cost coefficients:
 $d_Y = 0,2; d_D = 0,3; d_J = 0,3; d_X = 0,2$

w_Y	w_D	w_J	w_X	P3	P6	P7	P9	P11	P12
0,7	0,1	0,1	0,1	0,0148	0,1146	0,0536	0,0170	0,1068	0,0490
0,1	0,3	0,3	0,3	0,0001	0,0771	0,1164	0,0065	0,0538	0,1027
0	0,8	0,1	0,1	0,1902	0,1931	0,2481	0,0969	0,1471	0,1091
0,6	0,2	0,2	0	0,1279	0,1845	0,1333	0,0960	0,1690	0,0709
1	0	0	0	0,0222	0,1333	0,0222	0,0222	0,1333	0,0222
0	1	0	0	0,2727	0,2455	0,3000	0,1364	0,1909	0,1080
0	0	1	0	0,3000	0,2769	0,3000	0,2769	0,2538	0,1800
0	0	0	1	-0,5799	-0,3097	-0,2194	-0,3992	-0,3097	0,0468
0,5	0,5	0	0	0,1475	0,1894	0,1611	0,0793	0,1621	0,0651
0	0,5	0,5	0	0,2864	0,2612	0,3000	0,2066	0,2224	0,1440
0	0	0,5	0,5	-0,1399	-0,0164	0,0403	-0,0611	-0,0279	0,1134
0,5	0	0	0,5	-0,2788	-0,0882	-0,0986	-0,1885	-0,0882	0,0345
0,25	0,25	0,25	0,25	0,0038	0,0865	0,1007	0,0091	0,0671	0,0893
0,33	0,33	0,33	0	0,1963	0,2164	0,2053	0,1437	0,1908	0,1024
0	0,33	0,33	0,33	-0,0024	0,0702	0,1256	0,0047	0,0446	0,1105
0,33	0,33	0	0,33	-0,0940	0,0228	0,0339	-0,0794	0,0048	0,0584

Таблица 4. Результаты расчета аддитивной свертки с учетом стоимостных коэффициентов:
 $d_Y = 0,3; d_D = 0,1; d_J = 0,2; d_X = 0,4$

Table 4. The results of calculating the additive convolution when changing the cost coefficients:
 $d_Y = 0,3; d_D = 0,1; d_J = 0,2; d_X = 0,4$

w_Y	w_D	w_J	w_X	P3	P6	P7	P9	P11	P12
0,7	0,1	0,1	0,1	-0,0636	0,1047	0,0095	-0,0335	0,1013	0,0061
0,1	0,3	0,3	0,3	-0,2573	-0,0859	-0,0383	-0,1672	-0,0960	-0,0484
0	0,8	0,1	0,1	-0,0233	0,0220	0,0561	-0,0250	0,0059	0,0400
0,6	0,2	0,2	0	0,0782	0,1733	0,0800	0,0660	0,1666	0,0733
1	0	0	0	0,0333	0,2000	0,0333	0,0333	0,2000	0,0333
0	1	0	0	0,0909	0,0818	0,1000	0,0455	0,0636	0,0818
0	0	1	0	0,2000	0,1846	0,2000	0,1846	0,1692	0,1846
0	0	0	1	-1,1598	-0,6195	-0,4388	-0,7984	-0,6195	-0,4388
0,5	0,5	0	0	0,0621	0,1409	0,0667	0,0394	0,1318	0,0576
0	0,5	0,5	0	0,1455	0,1332	0,1500	0,1150	0,1164	0,1332
0	0	0,5	0,5	-0,4799	-0,2174	-0,1194	-0,3069	-0,2251	-0,1271
0,5	0	0	0,5	-0,5632	-0,2097	-0,2027	-0,3825	-0,2097	-0,2027
0,25	0,25	0,25	0,25	-0,2089	-0,0383	-0,0264	-0,1337	-0,0467	-0,0348
0,33	0,33	0,33	0	0,1070	0,1539	0,1100	0,0869	0,1428	0,0989
0	0,33	0,33	0,33	-0,2867	-0,1165	-0,0458	-0,1875	-0,1276	-0,0569
0,33	0,33	0	0,33	-0,3417	-0,1114	-0,1008	-0,2375	-0,1174	-0,1068

Из полученных расчетов видно (анализ табл. 3, 4), что при различных заданных комбинациях весовых коэффициентов w_J и коэффициентов стоимости d_J значения аддитивной свертки и соответственно выбор оптимального пути с учетом требований только QoS отличается от случаев, когда коэффициенты стоимости не учитываются (равны единице). Из выражения (6) также следует, что весовые коэффициенты и коэффициенты стоимости перемножаются, т. е. при расчете аддитивной свертки для поиска оптимального пути корректным решением является учет коэффициентов в виде следующего произведения: $w_J = w_J \cdot d_J$.

Проанализируем значения аддитивной свертки r для двух путей P6 и P7, меняя значения весовых коэффициентов задержки w_D и полосы пропускания w_Y , принимая при этом значения $w_J = w_X = 0,1$ (табл. 5, рис. 2).

Таблица 5. Результаты расчета r при изменении w_D
Table 5. Results of calculating r when changing w_D

w_Y	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
w_D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$r(P6)$	0,486	0,501	0,516	0,531	0,547	0,562	0,577
$r(P7)$	0,168	0,257	0,346	0,435	0,524	0,613	0,701

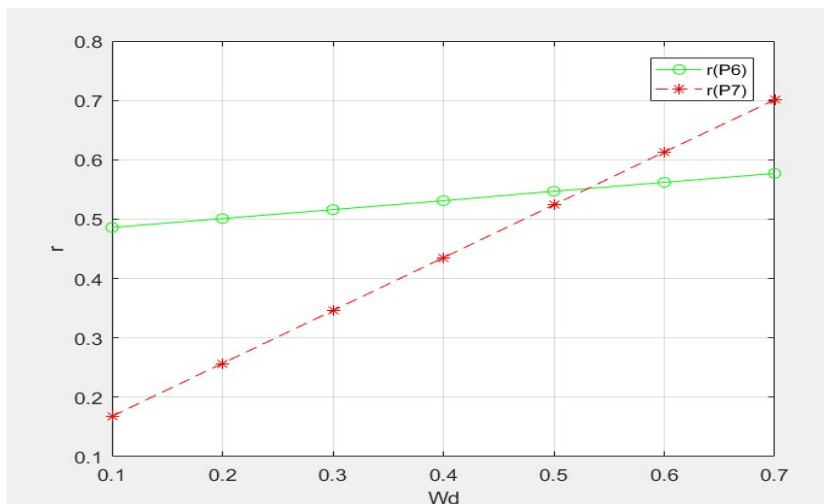


Рис. 2. Зависимость функции r от коэффициента задержки w_D
Fig. 2. Dependence of the function r on the delay coefficient w_D

Из представленных на рис. 2 зависимостей следует, что аддитивная свертка при вариации весовых коэффициентов задержки изменяется линейно, но для разных путей эти изменения могут быть различными и зависят от параметров самого пути.

Зависимости аддитивной свертки от вариации коэффициента w_J представлены в табл. 6 и на рис. 3. Принимаем значения $w_Y = w_X = 0,1$. Как следует из рис. 3., зависимость также линейная.

Таблица 6. Результаты расчета r при изменении w_J
Table 6. Results of calculating r when changing w_J

w_J	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
w_D	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$r(P7)$	-0,557	-0,347	-0,137	0,072	0,282	0,492	0,701

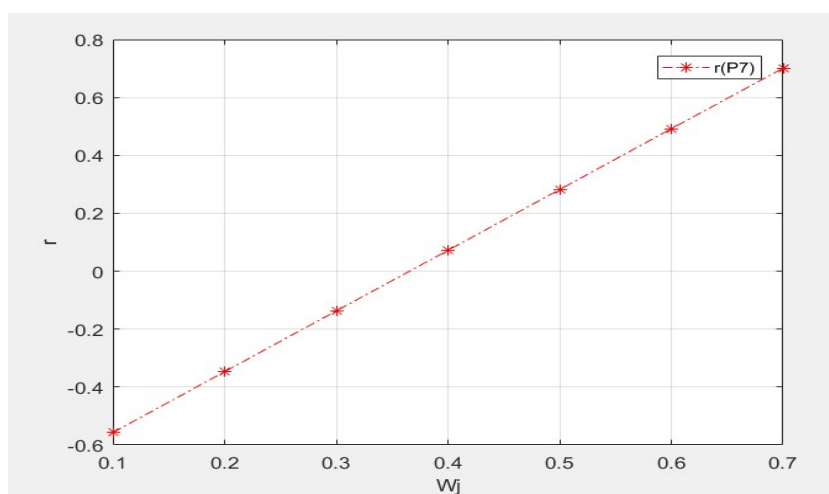


Рис. 3. Зависимость функции r от коэффициента вариации задержки w_J
Fig. 3. Dependence of the function r on the delay variation coefficient w_J

Зависимости аддитивной свертки от вариации коэффициента w_x представлены в табл. 7 и на рис. 4. Принимаем значения $w_J = w_D = 0,1$. Как следует из рис. 4, зависимость также линейная.

Таблица 7. Результаты расчета r при изменении w_x
Table 7. Calculating results of r when changing w_x

w_y	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
w_x	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$r(P3)$	-0,021	-0,322	-0,623	-0,924	-1,225	-1,527	-1,828

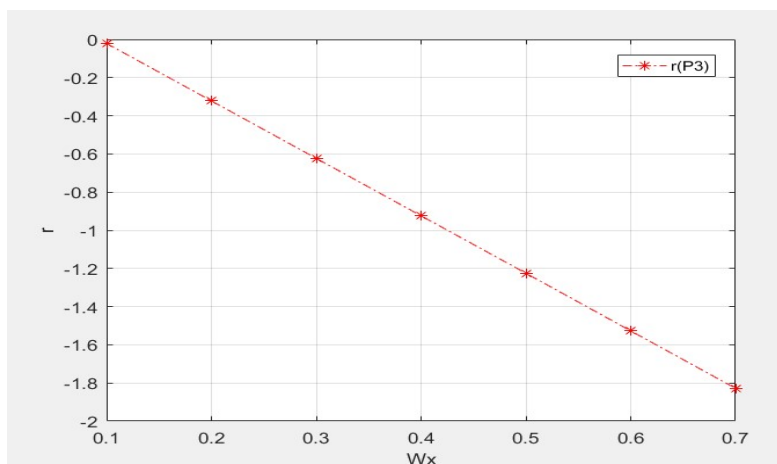


Рис. 4. Зависимость функции r от коэффициента вероятности прохождения пакетов w_x

Fig. 4. Dependence r on the coefficient of the probability of transmission of packets w_x

Как следует из представленных зависимостей, изменения аддитивной свертки линейны, однако характер этих изменений отличается: если в двух предыдущих случаях параметр r с ростом весовых коэффициентов линейно возрастал, то в данном случае этот коэффициент линейно падает.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Выбор оптимального пути с учетом требований заданного качества обслуживания осуществляется по наибольшему значению коэффициента r аддитивной свертки среди QoS-осуществимых путей. Весовые коэффициенты для каждого параметра целесообразно выбирать как интегральные весовые коэффициенты, равные произведению непосредственно весовых коэффициентов и коэффициентов стоимости.

2. Изменяя весовые коэффициенты по определенному алгоритму, можно получить набор маршрутов для предоставления различных услуг в мультисервисной сети в зависимости от требований тех или иных приложений.

3. При увеличении весовых коэффициентов по задержке, вариации задержки и пропускной способности величина аддитивной свертки возрастает, при увеличении же коэффициента вероятности прохождения пакетов аддитивная свертка снижается. Поскольку оптимальный путь всегда выбирается с наибольшим значением аддитивной свертки, следовательно, значение коэффициента вероятности прохождения пакетов влияет в большей степени на выбор оптимального пути, чем остальные коэффициенты.

Список литературы

1. Листопад Н.И., Величkevич И.О. Оптимальная маршрутизация информационных потоков с учетом параметров QoS. Доклады БГУИР. 2012;4(66):111-116.
2. Листопад Н.И., Воротницкий Ю.И., Хайдер А.А. Маршрутизация в мультисервисных сетях телекоммуникаций на основе модифицированного алгоритма Дейкстры. Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2015;1:70-76.

3. Girlich E., Kovalev M.M., Listopad N.I. Optimal choice of the capacities of telecommunication networks to provide QoS-routing. *Otto-von-Guericke- Universitat Magdeburg (Germany), Preprint*. 2009;21:14.
4. Cardeltini V., Casalicchio E., Grassi V., Presti F.L., Mirandola R. A Scalable Approach to QoS-Aware Self-adaptation in Service-Oriented Architectures. *Quality of Service in Heterogeneous Networks. 6th International ICST Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Q Shine 2009 and 3rd International Workshop on Advanced Architectures and Algorithms for Internet Delivery and Applications, AAA-IDEA 2009, Las Palmas, Gran Canaria*. 2009:431-447.

References

1. Listopad N.I., Velichkevich I.O. Optimal routing of information flows taking into account QOS parameters. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;4(66):111-116. (In Russ.)
2. Listopad N.I., Vorotnitsky Yu.I., Haider A.A. Routing in multiservice telecommunication networks based on the modified Dijkstra's algorithm. *Vestnik BSU. Ser. 1, Physics. Mathematics. Informatics*. 2015;1:70-76. (In Russ.)
3. Girlich E., Kovalev M.M., Listopad N.I. Optimal choice of the capacities of telecommunication networks to provide QoS-routing. *Otto-von-Guericke- Universitat Magdeburg (Germany), Preprint N 21*. 2009;21:14.
4. Cardeltini V., Casalicchio E., Grassi V., Presti F.L., Mirandola R.. A Scalable Approach to QoS-Aware Self-adaptation in Service-Oriented Architectures. *Quality of Service in Heterogeneous Networks. 6th International ICST Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Q Shine 2009 and 3rd International Workshop on Advanced Architectures and Algorithms for Internet Delivery and Applications, AAA-IDEA 2009, Las Palmas, Gran Canaria*. 2009:431-447.

Вклад авторов

Листопад Н.И. провел теоретическое обоснование исследуемой проблемы, разработал модели выбора оптимального пути, разработал заключение, провел анализ полученных результатов.

Лавшук О.А. провела численные эксперименты по выбору оптимального пути, проводила анализ полученных результатов и разработала рекомендации по выбору оптимального пути.

Authors' contribution

Listopad N.I. carried out a theoretical substantiation of the problem under study, developed a model for choosing the optimal path, developed a conclusion, as well as analyzed the results obtained.

Lavshuk O.A. conducted numerical experiments on choosing the optimal path, analyzed the results obtained, and developed recommendations for choosing the optimal path.

Сведения об авторах

Листопад Н.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лавшук О.А., аспирантка кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи.

Information about the authors

Listopad N.I., Dr of Sci., Professor, Head of the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lavshuk O.A., Postgraduate at the Department of Mathematics and Physics of the Belarusian State Academy of Telecommunications.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-23-04;
e-mail: listopad@bsuir.by
Листопад Николай Измаилович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. + 375-17-293-23-04;
e-mail: listopad@bsuir.by
Listopad Nikolai Izmailovich