

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-207-213

УДК 621.396

Многопутевая маршрутизация в сетях с ускоренной доставкой сообщений

Николай Викторович Колесов¹, Александр Михайлович Грузликов²,
Елизавета Геннадьевна Литуненко³, Виктор Сергеевич Тюльников⁴✉

^{1,2,3,4} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

¹ kolesovnv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>

² agruzlikov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>

³ lisa.litunenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5280-0593>

⁴ viktor.tyulnikov@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0005-5414-1567>

Аннотация

Введение. Рассмотрен класс телекоммуникационных географических сетей с подвижными узлами. Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого аппарата сети знания географических координат всех аппаратов и, как следствие, знания графа сети. Целью работы является разработка технологии построения множества путей передачи сообщений с их размещением на этих путях. **Метод.** Предложена технология многопутевой маршрутизации, которая включает процедуру поиска в сети набора путей, соединяющих источник сообщений с целевым узлом. Основу этой процедуры составляют модификация алгоритма Дейкстры для поиска кратчайшего пути в направленном графе, а также механизм построения дополнительных путей, который использует критерии минимумов длины и числа пересечений с исходным кратчайшим путем. Для ускорения доставки сообщений разработанная технология маршрутизации предполагает предварительное упорядочивание выходной очереди передаваемых сообщений на основе оптимальных правил. Критерием оптимальности служит минимум времени доставки сообщений. Правила сформулированы для различных случаев присутствия в очереди предварительно частично упорядоченных и неупорядоченных групп сообщений. Завершает процесс процедура размещения упорядоченной очереди на множестве путей передачи информации. **Основные результаты.** Представленная технология продемонстрирована на примере передачи очереди сообщений, содержащей три предварительно упорядоченные группы. Показано различие в результирующих упорядоченностях для случаев, когда прерывания запрещены или разрешены. **Обсуждение.** Возможность применения предложенной технологии определяется производительностью бортового процессора аппарата, которая априори будет достаточной в случае автономного необитаемого подводного аппарата.

Ключевые слова

телекоммуникационная сеть, многопутевая маршрутизация, кратчайший путь, ускорение доставки сообщений

Ссылка для цитирования: Колесов Н.В., Грузликов А.М., Литуненко Е.Г., Тюльников В.С. Многопутевая маршрутизация в сетях с ускоренной доставкой сообщений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 207–213. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-207-213

Multipath routing in networks with accelerated message delivery

Nikolay V. Kolesov¹, Alexander M. Gruzlikov², Elizaveta G. Litunenko³, Viktor S. Tyulnikov⁴✉

^{1,2,3,4} Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

¹ kolesovnv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>

² agruzlikov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>

³ lisa.litunenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5280-0593>

⁴ viktor.tyulnikov@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0005-5414-1567>

Abstract

This article examines the geography-aware class of telecommunication networks with mobile nodes. Their defining feature is that each network device knows the geographic coordinates of all other devices and, consequently, is

© Колесов Н.В., Грузликов А.М., Литуненко Е.Г., Тюльников В.С., 2026

fully aware of the network graph. The aim of this work is to develop a technique for constructing a set of message transmission paths with subsequent placement of messages across these paths. A multipath routing technique is introduced, featuring a procedure for finding a set of paths within the network that connect the message source to the target node. This procedure is based on a modified Dijkstra's algorithm for determining the shortest path in a directed graph. A method for constructing additional paths is described, which utilizes both the minimum path length criterion and the criterion of minimum intersections with the original shortest path. To accelerate message delivery, the proposed routing technique involves a preliminary ordering of the output message queue based on optimal scheduling rules. The optimality criterion is the minimization of total message delivery time. These rules are formulated for various scenarios involving the presence of pre-partially ordered and unordered message groups within the queue. The process concludes with a procedure for placing the ordered queue onto the set of information transmission paths. The proposed technique is exemplified by transmitting a message queue containing three pre-ordered groups. The difference in the resulting orderings is demonstrated for cases where preemptions are prohibited and where they are allowed. The feasibility of applying the proposed technique is determined by the performance of the device onboard processor, which is assumed to be a priori sufficient in the case of an autonomous unmanned underwater vehicle.

Keywords

telecommunication network, multipath routing, shortest path, message delivery acceleration

For citation: Kolesov N.V., Gruzlikov A.M., Litunenko E.G., Tiulnikov V.S. Multipath routing in networks with accelerated message delivery. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 207–213 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-207-213

Введение

Телекоммуникационные сети занимают важное место в современном мире. Под ними могут подразумеваться как вычислительные сети, так и сети связи. Узлы сети могут быть стационарными и подвижными, а соответствующие аппараты — подводными, надводными, а также воздушными [1–3]. В настоящей работе рассматривается класс сетей с подвижными узлами, в котором значимым подклассом являются так называемые географические сети. Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого аппарата сети знания географических координат всех 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 кратчайшего маршрута их доставки [4]. Этот вопрос в географических сетях может быть решен с привлечением известного алгоритма Дейкстры [5]. Однако на практике сети могут достигать весьма значительных размеров. В этом случае проблема маршрутизации сообщений приобретает высокую размерность. Она может быть преодолена путем перехода к ячеистым сетям, когда исходная сеть разбивается на подсети, в каждой из которых назначается маршрутизатор. При этом сеть маршрутизаторов образует так называемую сеть доступа. В результате описанного перехода сложность процедуры маршрутизации может быть существенно снижена [6]. Следует заметить, что в настоящее время задачей построения кратчайшего пути проблема маршрутизации не исчерпывается, а расширяется до проблемы многопутевой маршрутизации [7–14]. 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. Данная задача делится на две подзадачи: следует определить набор путей, связывающих точки отправления и приема сообщений;

необходимо наилучшим образом разместить на этих путях передаваемые сообщения. Решение этих подзадач рассмотрено в различных постановках. Некоторые решения предполагают использование полностью непересекающихся путей, другие, напротив, допускают их пересечения [10]. Также известны решения, обладающие способностью варьирования задержкой в передаче [11], свойствами адаптивности [12, 13] и энергосбережения [14]. Цель работы состоит в разработке технологии многопутевой маршрутизации, включающей две базовые процедуры. Первая процедура предназначена для построения множества путей передачи сообщений, а вторая — размещает передаваемые сообщения на этих путях. Технология предполагает предварительное упорядочивание сообщений с целью сокращения времени доставки.

Описание предлагаемого решения

Построение множества параллельных путей для передачи сообщений. 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 $\{e_i, i = 1, n\}$, где n — число ребер в графе $G(E, V)$, взвешены значениями расстояний между инцидентными вершинами $\{w_i, i = 1, n\}$. Требуется для заданной пары вершин графа найти необходимое количество кратчайших непересекающихся путей. Отметим, что успешность решения поставленной задачи зависит от свойств графа и от эффективности применяемых средств анализа. Возможно, что между выделенными вершинами непересекающихся путей нет, или они не являются кратчайшими. Потому на практике предметом поиска могут быть, например, пути с минимальным числом пересечений. Именно эта схема решения выбрана в данной работе.

Опишем кратко суть предлагаемого алгоритма. Сначала для двух выделенных вершин строится кратчайший путь с привлечением 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, отличающийся от алгоритма Дейкстры. В его основе лежит критерий минимума числа пересечений с ранее полученным кратчайшим путем, причем критерий минимума длины используется как вспомогательный. Заметим, что, если требуется построить большее число путей, то описанные действия могут быть продолжены по аналогии.

Напомним содержание алгоритма Дейкстры, который фактически представляет собой алгоритм динамического программирования и находит кратчайшие пути от заданной вершины графа до всех остальных. В соответствии с принципами динамического программирования алгоритм Дейкстры содержит прямой и обратный проходы по графу. При прямом проходе, когда вершины обрабатываются в направлении от исходной вершины к конечной, для каждой вершины вычисляется длина кратчайшего пути

$$l_{кр} = \sum_{i=1}^{n_{кр}} w_{кр,i}$$

где $n_{кр}$ — число ребер в кратчайшем пути; $w_{кр,i}$ — вес (длина) i -го ребра кратчайшего пути. При обратном проходе формируется кратчайший путь.

Пример 1. С помощью алгоритма Дейкстры сформируем для графа (рисунок, а) кратчайший путь для передачи сообщений от вершины А до вершины G.

1. Формируем очередь вершин для анализа на первом шаге (B, E, D). Длины путей до них из вершины А равны (8, 10, 17).
2. Для вершины D анализ завершен с длиной пути 17. Включаем в очередь вершин для анализа вершину F. Получаем от А очередь вершин (B, E, F) и список соответствующих длин путей (8, 10, 31).
3. Для всех вершин (B, E, D и F) из очереди анализ завершен с длинами путей (8, 10, 17 и 31).
4. Формируем очередь вершин для анализа (C, G). Длины путей до них из вершины А равны (15, 19). Анализ для этих вершин завершен.
5. В результате обратного прохода формируем путь А-В-G длиной 19.

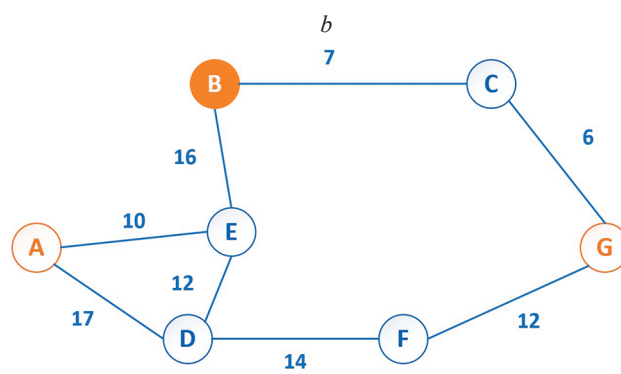
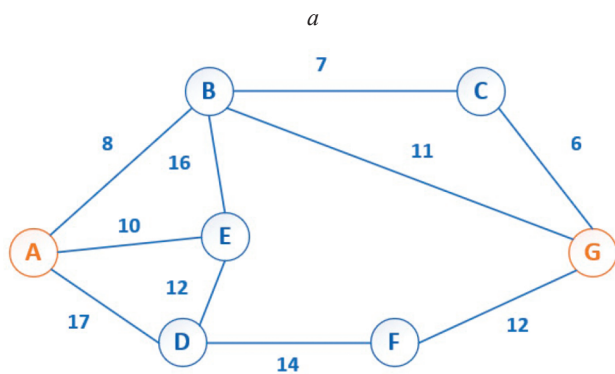


Рисунок. Графы сети: исходный (а); преобразованный (b)
Figure. Network graph: original (a); modified (b)

Рассмотрим процедуру построения второго (третьего и т. д.) пути. При этом используем сведение двухкритериальной задачи к двум последовательно решаемым однокритериальным задачам. Как уже отмечалось, первым критерием является минимум числа пересечений с ранее полученным кратчайшим путем.

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

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

где r_i — признак пересечения ребра i с ранее найденным кратчайшим путем.

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

1. Перейти к анализу графа $G'(E', V)$, который получается путем исключения из графа $G(E, V)$ ребер кратчайшего пути.
2. Построить в графе $G'(E', V)$ дублирующий путь с использованием алгоритма, который отличается от алгоритма Дейкстры содержанием правил обработки весов $\{S_j = (R_j, W_j), j = 1, m\}$ в вершинах $\{v_j, j = 1, m\}$ графа $G'(E', V)$, имеющими для ребра ρ , инцидентного вершинам v_k и v_j , следующий вид:

$$R_j(t+1) = \min\{(R_k(t) + r_i), R_j(t)\};$$

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

где $R_j(t)$ — минимальное накопленное число пересечений с предыдущими найденными путями среди всех путей из истока в вершину v_j на шаге t ; $W_j(t)$ — минимальная длина пути до вершины v_j , соответствующая значению $R_j(t)$ на шаге t ; $R_k(t)$ — минимальное накопленное число пересечений с предыдущими найденными

ми путями для пути, ведущего в вершину-предшественник v_k на шаге t ; $W_k(t)$ — минимальная длина пути до вершины v_k , соответствующая значению $R_k(t)$ на шаге t .

Пример 2. Сформируем для графа, представленного на рисунке, a , второй путь для передачи сообщений от вершины А до вершины G. Удалим из графа ребра кратчайшего пути, получив, таким образом, граф, показанный на рисунке, b . Для наглядности выделим вершину (выделена только вершина В), принадлежащую найденному кратчайшему пути. Применяя процедуру 1, получаем путь А-D-F-G длиной 43 без пересечений с кратчайшим путем.

Упорядочивание очереди сообщений при однопутевой маршрутизации. 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. Приведем соответствующие различным случаям оптимальные правила и алгоритмы упорядочивания сообщений. С доказательствами оптимальности этих алгоритмов можно ознакомиться в [15].

В качестве критерия оперативности использовано суммарное время Δ_s доставки всех сообщений из передаваемой последовательности или среднее по сообщениям время Δ доставки. При этом под временем доставки $\Delta_{[k]}$ сообщения, находящегося на k -й позиции в очереди рассматриваемого узла, будем понимать сумму времени ожидания в очереди $e_{[k]}^w$ передающего узла и времени переноса $e_{[k]}^t$ сообщения (время от момента начала передачи сообщения до момента конца его приема) между передающим узлом и узлом-адресатом

$$\Delta_{[k]} = e_{[k]}^w + e_{[k]}^t.$$

В случае многошагового маршрута, когда требуется ретрансляция сообщений через несколько абонентов сети, выражение для времени доставки сообщения принимает вид:

$$\Delta_{[k]} = \sum_{i=1}^{r_{[k]}} (e_{[k],i}^w + e_{[k],i}^t),$$

где $r_{[k]}$ — общее число шагов маршрута, по которому передается сообщение, находящееся на k -й позиции в очереди; i — порядковый номер шага маршрута.

Сформулируем правила для различных случаев присутствия в очереди неупорядоченных сообщений и предварительно частично упорядоченных групп сообщений.

Правило 1. Суммарное время Δ_s доставки в системе связи n неупорядоченных сообщений минимально, если сообщения упорядочены по неубыванию длительностей

$$e_{[1]} \leq e_{[2]} \leq \dots \leq e_{[n]}.$$

Предположим, что на множестве сообщений нужно задавать некоторые предпочтения. Тогда можно использовать

пользовать в качестве критерия суммарное взвешенное время Δ_s^w доставки сообщений

$$\Delta_s^w = \sum_{k=1}^n w_{[k]} \Delta_{[k]},$$

где $w_{[k]}$ — вес сообщения, расположенного на k -й позиции в очереди.

Правило 2. Суммарное взвешенное время Δ_s^w доставки неупорядоченных сообщений в системе связи минимально, если выполняется условие:

$$\frac{e_{[1]}}{w_1} \leq \frac{e_{[2]}}{w_2} \leq \dots \leq \frac{e_{[n]}}{w_n}.$$

Выполним упорядочивание очереди частично упорядоченных сообщений при однопутевой маршрутизации. Пусть планируемые для передачи сообщения частично упорядочены путем разбиения на p непересекающихся групп со строгим упорядочением сообщений внутри них и мощностью n_i , $i = 1, p$. Подобное упорядочение может потребоваться в силу разных дополнительных соображений, связанных с управлением передачей информации через сеть. Предполагается, что при составлении общего плана должен сохраняться зафиксированный в группе порядок передачи сообщений, а прерывания групп сообщений запрещены. Обозначим через e'_i суммарную длительность i -й группы сообщений

$$e'_i = \sum_{j=1}^{n_i} e_{i,j}.$$

Правило 3. Суммарное время Δ_s доставки сообщений в системе связи с p строго упорядоченными группами при запрете прерываний групп минимально, если группы в плане упорядочены по неубыванию длительностей

$$e'_{[1]} \leq e'_{[2]} \leq \dots \leq e'_{[p]}.$$

Если необходимо задать предпочтения на множестве групп сообщений, т. е. минимизировать критерий

$$\Delta_g^w = \sum_{k=1}^p w_{[k]} \Delta_{g[k]},$$

то группы сообщений с учетом правила 2 должны быть упорядочены по условию:

$$\frac{e'_{[1]}}{w_1} \leq \frac{e'_{[2]}}{w_2} \leq \dots \leq \frac{e'_{[p]}}{w_p}.$$

Очевидно, что полученные результаты правил 1–3 остаются справедливыми, если в качестве критерия оптимальности использовать не суммарное время доставки, а среднее по сообщениям Δ или среднее по группам сообщений Δ_g .

Ситуация усложняется, когда требуется минимизировать среднее по сообщениям время доставки. Тогда справедливо следующее правило.

Правило 4. Среднее время Δ доставки сообщений в системе связи с p строго упорядоченными группами при запрете прерываний групп минимально, если группы в плане упорядочены по неубыванию длительностей

$$\frac{e'_{[1]}}{n_{[1]}} \leq \frac{e'_{[2]}}{n_{[2]}} \leq \dots \leq \frac{e'_{[p]}}{n_{[p]}}$$

Рассмотрим наиболее сложную ситуацию, когда прерывание процесса передачи группы разрешено.

Правило 5. Среднее время Δ доставки сообщений в системе связи с p строго упорядоченными группами минимально при разрешении прерываний групп, если группы в плане упорядочены по следующим шагам.

Шаг 1. Для каждого сообщения j в i -й группе вычисляется условное среднее время доставки (при условии размещения подгруппы сообщений, предшествующей $(j + 1)$ -му сообщению в i -й группе, в начале формируемой очереди)

$$\bar{\Delta}_{i,j} = \frac{\hat{\Delta}_{i,j}}{j} = \frac{\sum_{h=1}^j \hat{\Delta}_{i,h}}{j}$$

Шаг 2. Для каждой i -й группы вычисляется

$$\bar{\Delta}_{i,\min} = \min(\bar{\Delta}_{i,1}, \bar{\Delta}_{i,2}, \dots, \bar{\Delta}_{i,n_i})$$

Шаг 3. Выбирается такая группа i^* , что

$$i^* = \arg \min_i \bar{\Delta}_{i,\min}$$

и первые (i, \min) -сообщения составляют начало очереди.

Шаг 4. Вычисляются величины $\bar{\Delta}_{i,\min}$, но без учета сообщений, размещенных в очереди.

Шаг 5. Повторяются шаги 3 и 4 до упорядочения всех сообщений.

Пример 3. Сформируем очереди, используя правила 4 и 5, для трех упорядоченных групп сообщений $g_1 = \{g_{11}, g_{12}, g_{13}\}$, $g_2 = \{g_{21}, g_{22}\}$, $g_3 = \{g_{31}, g_{32}, g_{33}, g_{34}\}$. Времена доставок для сообщений приведены в табл. 1.

Прерывания запрещены. Средние времена доставок сообщений для групп: $\Delta_1 = 8$, $\Delta_2 = 8,5$, $\Delta_3 = 6$.

Результирующая очередь: $Q_1 = g_{33}g_{12} = g_{31}, g_{32}, g_{33}, g_{34}, g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{22}$.

Прерывания разрешены. Действуя в соответствии с правилом 5, последовательно за 8 шагов размещаем в очереди фрагменты групп. Условные средние времена доставок фрагментов групп для всех шагов приведены в табл. 2.

Результирующая очередь: $Q_2 = g_{21}, g_{11}, g_{31}, g_{32}, g_{33}, g_{34}, g_{12}, g_{13}, g_{22}$.

Упорядочивание очередей сообщений при многопутевой маршрутизации. Рассмотрим процедуру для случая многопутевой маршрутизации, основанную на

Таблица 1. Время доставки сообщений в группах, усл. ед.
Table 1. Message delivery time in groups, in conventional units

Группы сообщений	Сообщения			
	Δ_{i1}	Δ_{i2}	Δ_{i3}	Δ_{i4}
g_1	5	15	4	—
g_2	3	14	—	—
g_3	10	2	5	7

Примечание. $\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \Delta_{i3}$ и Δ_{i4} — время доставки сообщений 1, 2, 3 и 4 в группе i соответственно.

правилах 1–5. Предполагается, что в рассматриваемом узле сети сформирована очередь сообщений для передачи некоторому единственному адресату. При этом для сокращения времени доставки используется более одного пути.

Процедура 2.

Этап 1. Сформированная выходная очередь сообщений упорядочивается, как и в случае однопутевой маршрутизации (правила 1–5), обеспечивая сокращение времени доставки при однопутевой маршрутизации.

Этап 2. Преобразованная очередь распределяется между путями доставки с сохранением достигнутой упорядоченности и обеспечением сбалансированности нагрузки.

Этап 3. Происходит восстановление исходной очереди при приеме. Отметим, что предлагаемое решение в общем случае является приближенным.

Рассмотрим подробнее этап 2. Предположим, что используется m путей, равных по длине. Если предположить равенство длин всех сообщений, то, очевидно, что распределение очереди между всеми путями по принципу «змейки» приводит к сбалансированному и сохраняющему упорядоченность решению. Оно является оптимальным с точностью до значения длительности сообщения. Если для исходной очереди длины n обозначить через i номер ее члена, а через i_1, i_2, \dots, i_m номера членов частных очередей, то процедуре распределения соответствует записанное в псевдокоде формальное правило.

Правило 6.

```

i:=1
while i ≤ n
if (i mod m) = 0 then i1:= i, i1:= i1 + 1,
if (i mod m) = 1 then i2:= i, i2:= i2 + 1,
...
if (i mod m) = m - 1 then im:= i, im:= im + 1.
i:= i + 1.
    
```

Таблица 2. Условное среднее время доставки фрагментов групп, усл. ед.
Table 2. Conditional average delivery time of group fragments, in conventional units

Группы сообщений	Фрагменты группы																															
	$\bar{\Delta}^1$				$\bar{\Delta}^2$				$\bar{\Delta}^3$				$\bar{\Delta}^4$				$\bar{\Delta}^5$				$\bar{\Delta}^6$				$\bar{\Delta}^7$				$\bar{\Delta}^8$			
g_1	5	10	8	—	5	10	8	—	15	9,5	—	—	15	9,5	15	9,5	15	9,5	15	9,5	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
g_2	3	8,5	—	—	14	—	—	—	14	—	—	—	14	—	14	—	14	—	14	—	14	—	14	—	14	—	14	—	14	—		
g_3	10	6	5,6	6	10	6	5,6	6	10	6	5,6	6	5	6	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

Содержание этапа 3 в данном случае также представляет «змейку».

Предположим теперь, что длительности сообщений по-прежнему одинаковы, но используемые пути не равны по длине. Упорядочим их по возрастанию длины. Пусть при этом j -й путь длиннее $(j - 1)$ -го пути на величину Δ_j . Тогда очевидно, что при сохранении содержания этапа 2 на этапе 3 может быть использовано правило 6, но отличающееся от него дополнительным смещением членов частных принимаемых последовательностей.

Правило 7.

$i := 1$
 while $i \leq n$
 if $(i \bmod m) = 0$ then $i := i_1, i_1 := i_1 + 1,$
 if $(i \bmod m) = 1$ then $i := i_2 + \Delta_2, i_2 := i_2 + 1,$
 ...
 if $(i \bmod m) = m - 1$ then $i := i_m + \Delta_m, i_m := i_m + 1,$

Алгоритм маршрутизации, основанный на правилах 6 и 7, предлагается использовать и в других случаях, характеризующихся несовпадающими длительностями сообщений и наличием пересечений в используемых для доставки путях. Заметим, что подобное применение будет сопровождаться потерями эффективности.

Литература

- Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks // *Computer Standards and Interfaces*. 2020. V. 72. P. 103451. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103451>
- Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатиук А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. 368 с.
- Франк М.О., Овчинников К.Д. Ретроспективный анализ проектных характеристик безэкипажных судов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020. № S2. С. 160–164. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-160-164>
- Кулагин Г.И. Анализ особенностей и методов определения маршрутов доставки данных в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе беспилотных летательных аппаратов // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*. 2023. № 1 (142). С. 60–82. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-60-82>
- Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: Вильямс, 2009. 1290 с.
- Кузнецов К.А., Парамонов А.И., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Модель и методы маршрутизации трафика в сети связи с использованием БПЛА // *Труды учебных заведений связи*. 2024. Т. 10. № 4. С. 62–72. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-62-72>
- Еременко А.С. Потокковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети // *Проблемы телекоммуникаций*. 2015. № 1 (16). С. 85–93.
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths // *Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839>
- Zuo Y., Ling Z., Yuan Y. A hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks // *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. 2013. V. 2013. P. 82. <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2013-82>
- Venkatesh K., Srinivas L.N.B., Krishnan M.B., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based

Обсуждение

В настоящей работе не рассматривался конкретный класс сетей с подвижными узлами, а сделан акцент только на наличие свойства географичности. Предлагаемый подход может быть применен для разных решений и классов сетей. Решение будет эффективным для сетей, топология которых не претерпевает значительных изменений в течение времени передачи сообщения. Для случая, когда топология сети изменяется более динамично, абоненты сети должны обладать достаточно мощными вычислителями, обеспечивающими быструю оценку изменений топологии сети и построение маршрутов передачи сообщений, что позволит осуществлять маршрутизацию сообщений в реальном времени без задержек.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы создания технологии многопутевой маршрутизации сообщений в телекоммуникационной сети. 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.

References

- Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks. *Computer Standards and Interfaces*, 2020, vol. 72, pp. 103451. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103451>
- Inzartcev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Iu.V., Pavin A.M., Shcherbatiuk A.F. *Underwater Robotics: Systems, Technologies, Application*. Vladivostok, FGBUN Institut problem morskikh tehnologij DVO RAN, 2018, 368 p. (in Russian)
- Frank M., Ovchinnikov K. Design parameters of unmanned vessels: retrospective analysis. *Transactions of the Krylov state research centre*, 2020, no. S2, pp. 160–164. (in Russian). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-160-164>
- Kulagin G.I. Analysis of features and methods for data delivery routes determination in the wireless self-organizing networks based on the unmanned aerial vehicles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 1 (142), pp. 60–82 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-60-82>
- Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein K. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill, 2001, 1056 p.
- Kuznetsov K.A., Paramonov A.I., Muthanna A.S.A., Kucheryavy A.E. Model and methods of traffic routing in a communication network using UAVs. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 62–72. (in Russian). <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-62-72>
- Eremenko A.S. A flow-oriented model of multipath routing along disjoint paths in a telecommunications network. *Problems of Telecommunications*, 2015, no. 1 (16), pp. 85–93. (in Russian)
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths. *Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839>
- Zuo Y., Ling Z., Yuan Y. A hybrid multi-path routing algorithm for industrial wireless mesh networks. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013, vol. 2013, pp. 82. <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2013-82>
- Venkatesh K., Srinivas L.N.B., Krishnan M.B., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications. *Future Generation*

- multipath routing for medical applications // *Future Generation Computer Systems*. 2019. V. 93. P. 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.032>
11. Ducatelle F., Di Caro G., Gambardella L.M. Ant agents for hybrid multipath routing in mobile ad hoc networks // *Proc. of the 2nd Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*. 2005. P. 44–53. <https://doi.org/10.1109/wons.2005.3>
 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. V. 106. P. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.03.002>
 13. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Разработка и исследование математической модели многопутевой адаптивной маршрутизации в сетях связи с балансировкой нагрузки // *Электросвязь*. 2014. № 12. С. 27–31.
 14. Rajasekaran K., Balasubramanian K. Energy conscious based multipath routing algorithm in WSN // *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*. 2016. V. 8. N 1. P. 27–34. <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2016.01.04>
 15. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М. Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2022. Т. 6. № 6. С. 56–64. <https://doi.org/10.31857/S0002338822060105>
- Computer Systems*, 2019, vol. 93, pp. 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.032>
11. Ducatelle F., Di Caro G., Gambardella L.M. Ant agents for hybrid multipath routing in mobile ad hoc networks. *Proc. of the 2nd Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, 2005, pp. 44–53. <https://doi.org/10.1109/wons.2005.3>
 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, vol. 106, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.03.002>
 13. Koryachko V.P., Perepelkin D.A. Development and research of the mathematical model multipath adaptive routing in telecommunication networks with load balancing. *Elektrosvjaz*, 2014, no. 12, pp. 27–31. (in Russian)
 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. <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2016.01.04>
 15. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunen E.G., Skorodumov Y.M. Optimization of information exchange in a network of autonomous participants. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2022, vol. 61, no. 6, pp. 935–943. <https://doi.org/10.1134/S1064230722060107>

Авторы

Колесов Николай Викторович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 6602000556](https://orcid.org/0000-0003-3287-7504), <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>, kolesovnv@mail.ru

Грузликов Александр Михайлович — кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 56037536900](https://orcid.org/0000-0001-8814-0726), <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>, agruzlikov@yandex.ru

Литуненко Елизавета Геннадьевна — кандидат технических наук, младший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57796319900](https://orcid.org/0000-0001-5280-0593), <https://orcid.org/0000-0001-5280-0593>, lisa.litunenko@gmail.com

Тюльников Виктор Сергеевич — инженер-программист, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 59676378200](https://orcid.org/0009-0005-5414-1567), <https://orcid.org/0009-0005-5414-1567>, viktor.tyulnikov@gmail.com

Authors

Nikolay V. Kolesov — D.Sc., Professor, Chief Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation [sc 6602000556](https://orcid.org/0000-0003-3287-7504), <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>, kolesovnv@mail.ru

Alexander M. Gruzlikov — PhD, Head of Department, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 56037536900](https://orcid.org/0000-0001-8814-0726), <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>, agruzlikov@yandex.ru

Elizaveta G. Litunen — PhD, Junior Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57796319900](https://orcid.org/0000-0001-5280-0593), <https://orcid.org/0000-0001-5280-0593>, lisa.litunenko@gmail.com

Viktor S. Tyulnikov — Software Engineer, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 59676378200](https://orcid.org/0009-0005-5414-1567), <https://orcid.org/0009-0005-5414-1567>, viktor.tyulnikov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.06.2025
Одобрена после рецензирования 14.12.2025
Принята к печати 21.01.2026

Received 17.06.2025
Approved after reviewing 14.12.2025
Accepted 21.01.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»